

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛАРУСИ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ ПО НАУКЕ И ТЕХНОЛОГИЯМ  
МИНИСТЕРСТВО ПРОМЫШЛЕННОСТИ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
ПОЛОЦКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ОАО «НПО «ЦЕНТР  
НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПАРК  
ПОЛОЦКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА

## **Инновационные технологии в машиностроении**

Электронный сборник материалов международной  
научно-технической конференции,  
посвященной 50-летию машиностроительных специальностей  
и 15-летию научно-технологического парка  
Полоцкого государственного университета  
(Новополоцк, 21-22 апреля 2020 г.)



Под редакцией  
чл.-корр. НАН Беларуси, д-ра техн. наук, проф. В. К. Шелега;  
д-ра техн. наук, проф. Н. Н. Попок

Новополоцк  
Полоцкий государственный университет  
2020

УДК 621(082)

*Редакционная коллегия:*

Н. Н. Попок (председатель), В. П. Иванов (зам. председателя),  
Р. С. Хмельницкий (отв. Секретарь), А.В. Дудан, В. А. Данилов, Е.В. Бритик

***Инновационные технологии в машиностроении*** [Электронный ресурс] : электронный сборник материалов международной научно-технической конференции, посвященной 50-летию машиностроительных специальностей и 15-летию научно-технологического парка Полоцкого государственного университета, Новополоцк, 21-22 апр. 2020 г. / Полоц. гос. ун-т ; под. ред. В. К. Шелега; Н. Н. Попок. – Новополоцк : Полоц. гос. ун-т, 2020. – 1 опт. диск (CD-ROM).

ISBN 978-985-531-691-7.

Отражены современное состояние и направления развития технологии и оборудования механической и физико-технической обработки; рассмотрены вопросы создания современных материалов, изготовления, восстановления и упрочнения деталей машин, автоматизации производства, эксплуатации и модернизации автомобилей и других машин.

Для научных и инженерно-технических работников исследовательских, проектных и производственных организаций, а также преподавателей, аспирантов, магистрантов и студентов технических специальностей учреждений образования.

Прилагаются [титulyные листы презентаций докладов](#) участников конференции.

*Сборник включен в Государственный регистр информационного ресурса. Регистрационное свидетельство № 3141815008 от 28.03.2018.*

211440, ул. Блохина, 29, г. Новополоцк, Беларусь  
тел. 8 (0214) 59-95-53, e-mail: n.popok@psu.by

**№ госрегистрации 3141815008**

**ISBN 978-985-531-691-7**

© Полоцкий государственный университет, 2020

Для создания текстового электронного издания «Инновационный технологии в машиностроении» использованы текстовый процессор Microsoft Word и программа Adobe Acrobat XI Pro для создания и просмотра электронных публикаций в формате PDF.

Компьютерный дизайн *Е. А. Балабуевой*  
Техническое редактирование и верстка *И. Н. Чапкевич*

---

Подписано к использованию 23.04.2020.  
Объем издания: 10,9 Мб. Тираж 3 диска. Заказ 264.

---

Издатель и полиграфическое исполнение:  
учреждение образования «Полоцкий государственный университет».

Свидетельство о государственной регистрации  
издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий  
№ 1/305 от 22.04.2014.

ЛП № 02330/278 от 08.05.2014.

211440, ул. Блохина, 29,  
г. Новополоцк,  
Тел. 8 (0214) 59-95-41, 59-95-44  
<http://www.psu.by>

## СОДЕРЖАНИЕ

<u>Приветственное слово</u> .....	8
-----------------------------------	---

### Секция 1

#### ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

<u>Попок Н.Н.</u> К 50-летию машиностроительных специальностей и научных исследований в полоцком государственном университете .....	9
<u>Базров Б.М., Хейфец М.Л., Чижик С.А.</u> Проектирование комплексов технологического оборудования аддитивного и субтрактивного производства .....	17
<u>D. Bičkauskė, A. Jakubavičius, M. Vilyis</u> Analysis of industry digitization opportunities in Lithuania .....	21
<u>Сильванович О.В., Гутковский А.И., Паташков Ю.Г., Бородавко В.И., Хейфец М.Л., Грецкий Н.Л.</u> Проектирование и изготовление современного стрелкового оружия для спортивных соревнований и добычи объектов животного мира .....	26
<u>Кане М.М., Шелег В.К., Кравчук М.А., Кот П.И.</u> Определение требований к показателям качества цилиндрических шестерён на операциях их обработки с учётом пооперационных взаимосвязей между этими показателями .....	30
<u>Беляков Н.В., Махаринский Ю.Е., Попок Н.Н.</u> САПР универсально-сборных станочных приспособлений для корпусных деталей .....	34
<u>Кананович Н.А., Поболь И.Л., Предко А.А.</u> Изготовление с применением аддитивных технологий полимерного изделия с последующей металлизацией медью .....	37
<u>Попок Н.Н., Портянко С.А.</u> Подготовка машиностроительного производства на основе 3D-прототипирования технологической оснастки .....	41
<u>Попок Н.Н., Бритик Е.В.</u> Степень сложности как универсальный показатель оценки машиностроительного оборудования .....	43
<u>Кананович Н.А., Предко А.А.</u> Послойный химический анализ алюмооксидного покрытия на силумине .....	49
<u>Кукареко В.А., Кушнеров А.В., Марукович Е.И.</u> Влияние условий кристаллизации малоразмерных отливок из алюминиевой бронзы .....	52
на их структурно-фазовое состояние и дюрометрические свойства	
<u>Жорник В.И., Ивахник А.В., Запольский А.В.</u> Пластичные смазки с гетерогенной дисперсной фазой для тяжелонагруженных и высокотемпературных узлов трения .....	56
<u>Брижневич А.В., Борис Е.В., Коднянко Е.В.</u> Импортозамещающее оборудование для добычи калийных солей производства ЗАО «Солигорский институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством» .....	60
<u>Дворник А.П., Калинин Ю.В.</u> Повышение безопасности шахтных подъемных установок .....	62
<u>Опарина И.Б., Колмаков А.Г., Хейфец И.М.</u> Автоматизированная система управления пайкой .....	69



## Секция 2 МЕХАНИЧЕСКАЯ И ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКАЯ

<b><u>Витязь П.А., Сенють В.Т., Хейфец М.Л., Колмаков А.Г.</u></b> Обработка материалов структурные особенности термобарически обработанных металломатричных композитов на основе алюминия и сплава ПГ-СР4 с добавкой наноструктурного кубического Вп .....	72
<b><u>Белявин К.Е., Белоцерковский М.А., Сосновский И.А., Курилёнок А.А.</u></b> Технология центробежной индукционной наплавки покрытий на детали ходовых сопряжений путевой техники .....	76
<b><u>Акулович Л.М., Сергеев Л.Е., Залуцкий М.А.</u></b> Применение полусинтетических смазочно-охлаждающих технологических средств для магнитно-абразивной обработки .....	80
<b><u>Попок Н.Н., Хмельницкий Р.С., Гвоздь Г.И., Анисимов В.С.</u></b> Многоцелевая обработка поверхностей деталей на станках с ЧПУ .....	83
<b><u>Белоцерковский М.А., Кукареко В.А., Григорчик А.Н., Астрашаб Е.В.</u></b> Влияние времени отжига газотермических покрытий из псевдосплава «Х20Н80+АД-1» на его структурно-фазовое состояние и твердость .....	87
<b><u>Предко А.А., Посылкина О.И., Кананович Н.А.</u></b> Коррозионные свойства многокомпонентных покрытий Ti-Zr-N, сформированных вакуумно-плазменными методами .....	91
<b><u>Дудан А.В., Соловых Е.К., Ковалев М.Ф., Головащук М., Кулыжский В.Н.</u></b> Повышение прочности элементов конструкций нанесением на их поверхность покрытий .....	94
<b><u>Рутковский А.В., Зиньковский А.П., Пшеничкин Д.О., Лопата Л.А., Агеев М.С., Дудан А.В.</u></b> Влияние импульсного ионного азотирования на свойства покрытий, полученных электродуговым напылением .....	98
<b><u>Дудан А.В., Микосянчик О.А., Мнацаканов Р.Г., Радько О.В., Ивченко Т.И.</u></b> Прочностной аспект поверхностного слоя материала элементов конструкций .....	102
<b><u>Дудан А.В., Калинин В.И., Лопата А.В., Смирнов И.В., Николайчук В.Я.</u></b> Об основных концепциях решения проблемы упрочняющих покрытий .....	105
<b><u>Бурин А.А., Юревич С.В., Поболь И.Л.</u></b> Электронно-лучевая сварка деталей типа «втулка» с использованием методов предотвращения образования дефектов в сварном шве .....	109
<b><u>Босяков М.Н., Моисеенко А.Н., Грицук А.А.</u></b> Конструктивные особенности оборудования и технологий высокотемпературной плазменной химико-термической обработки деталей .....	113
<b><u>Данилов А.А.</u></b> Анализ и реализация схемы полигонального формирования треугольника Рело методом огибания .....	115
<b><u>Данилов В.А., Селицкий А.Н.</u></b> Износ резцов при ротационном точении синусоидальных цилиндрических поверхностей .....	119

<u><b>Потапов А.А., Штемпель О.П.</b></u> Обеспечение работоспособности гомогенизирующей головки гомогенизатора FBF 075 в условиях импортозамещения .....	123
<u><b>Синькевич Ю.В.</b></u> Механизм самоорганизации движения электролита в условиях электроимпульсного полирования .....	127
<u><b>Кириенко А.С., Завистовский С.Э.</b></u> Совершенствование эксплуатационных характеристик ленточного шлифовального инструмента моделированием рабочих слоев в электростатическом поле .....	131
<u><b>Кириенко А.С., Завистовский С.Э.</b></u> Оптимизация расположения зерен абразива при электростатическом нанесении рабочих слоев эластичного инструмента с управляемой режущей способностью .....	136
<u><b>Кириенко А.С.</b></u> Модифицирование технологии переработки офисной макулатуры .....	141
<u><b>Шкурко В.В., Хейфец И.М., Алексеева Т.А.</b></u> Анализ технических средств и программного обеспечения для управления физико-механическими и геометрическими параметрами качества продукции .....	145
<u><b>Семенченко М.В.</b></u> Технология изготовления диффузионно- легированной проволоки .....	148
<u><b>Семенченко М.В.</b></u> Установка для получения диффузионно- легированной проволоки .....	151

### Секция 3

#### МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТЕХНИКИ

<u><b>Иванов В.П., Вигерина Т.В.</b></u> Обоснование рентабельности ремонта автомобильных агрегатов .....	154
<u><b>Попок Н.Н., Анисимов В.С., Баилачѐв Д.А., Пуйман Е.В.</b></u> <b>Кукареко В.А.</b> Сравнительная стойкость комбинированных покрытий .....	157
<u><b>Коднянко М.Ю., Высоцкая Н.А., Дубовский А.А.</b></u> Особенности изнашивания эластомеров, применяемых для изготовления манжет бурового насоса .....	161
<u><b>Громыко П.Н., Хатетовский С.Н.</b></u> Влияние погрешностей изготовления и сборки на эксплуатационные характеристики передач эксцентрикового типа .....	165
<u><b>Сосновский А.В., Трусев Д.И., Лавренова О.А.</b></u> Влияние высокоэнтальпийных горючих газов на состав и дюрометрические свойства покрытий, полученных методом гиперзвуковой металлизации .....	168
<u><b>Миранович А.В., Акулович Л.М., Мисько В.Г.</b></u> Формирование градиента структуры поверхностного слоя при магнитно-электрическом упрочнении .....	172
<u><b>Шевченко Д.С., Гуца А.А.</b></u> Альтернативные методы диагностирования систем COMMON RAIL современных дизельных двигателей .....	176
<u><b>Кострицкий В.В., Павченко А.В.</b></u> Повышение эффективности диагностирования электронных систем управления двигателем .....	180
<u><b>Штемпель О.П., Конон М.В., Конон И.М.</b></u> Технология ремонта трещин чугуновой головки блока цилиндров .....	184
<u><b>Белоцерковский М.А., Таран И.И., Кот П.И.</b></u> Формирование износостойких покрытий на поверхности полимерных деталей .....	187
<u><b>Белоцерковский М.А., Яловик А.П., Коновалова Е.Ф.</b></u> Комбинированные технологии восстановления деталей узлов трения скольжения .....	190

<u>Пилипенко С.В., Фруцкий В.А.</u> Восстановление прессовой оснастки плазменной наплавкой .....	194
<u>Капленко В.С., Поболь И.Л., Олешук И.Г.</u> Исследование структуры и свойств упрочнённых слоев, полученных методом ионно-плазменного азотирования на нержавеющей стали 08X18H10T .....	197
<u>Леванцевич М.А., Козловский И.А., Столяров А.С., Голушко А.А.</u> Исследование химического состава и триботехнических характеристик деформационно-плакированных гетерогенных покрытий .....	200
<u>Клепацкий И.К., Раповец В.В.</u> Упрочнение ножей фрезерно-брусующих станков для механической обработки древесины в производственных условиях .....	204
<u>Дудан А.В., Харламов Ю.А., Лопата В.Н.</u> Упрочнение и восстановление деталей с учетом условий изнашивания сопряжений .....	209
<u>Ольшанский В.И., Пятов В.В., Клименков С.С., Беляков Н.В., Махаринский Ю.Е., Жерносек, С.В., Ковчур А.С., Алексеев И.С., Дорошенко И.А., Латушкин Д.Г., Голубев А.Н., Окунев Р.В.</u> Научно-технические направления исследований кафедры технологии и оборудования машиностроительного производства Витебского государственного технологического университета в области инновационных технологий машиностроения .....	213

Уважаемые коллеги!

Мы рады приветствовать участников конференции.

Проводимая международная научно-техническая конференция «Инновационные технологии в машиностроении» является традиционной. В этом году она посвящена 50-летию машиностроительных специальностей и 15-летию научно-технического парка Полоцкого государственного университета.

Конференция ставит своей целью подвести итоги достигнутых результатов в науке, методическом обеспечении подготовки кадров для машиностроения, озвучить результаты взаимодействия университета с промышленностью через инновационные структуры за последние два года.

Полоцкий государственный университет – динамично развивающийся вуз, где сегодня обучается около 7 тыс. студентов. Подготовка ведется на 7 факультетах и 25 кафедрах по 40 специальностям как технического, так и гуманитарного профиля. Работает 17 докторов и профессоров и более 150 кандидатов наук, были сформированы научные школы по различным направлениям под руководством известных в стране и за рубежом ученых: Бабенко Э.М., Левина А.М., Луговского С.И., Семенова А.И., Надыкто Б.Т., Лазовского Д.Н., Пантелеенко Ф.И., Абаева Г.Н., Гугнина А.А., Груздева В.А., Липского В.К., Данилова В.А., Попок Н.Н., Иванова В.П., Хейфеца М.Л., Железняк В.К., Ехилевского С.Г. и других. Уникальность научных школ определяет сочетание российских (советских) и белорусских традиций в образовании и науке. Развитию научных школ способствуют выпускники магистратуры и аспирантуры, молодые ученые университета. В преемственности поколений ученых и развитии международных связей – залог развития науки и образования.

Полоцкий государственный университет участвует в государственных программах по важнейшим научным направлениям, является головной организацией-исполнителем Региональной научно-технической программы «Инновационное развитие Витебской области», выполняет хозяйственные работы с предприятиями и организациями региона, развивает инновационные структуры (Новополоцкий нефтехимический кластер, Центр трансфера технологий и научно-технологический парк).

Желаем всем участникам конференции успешной работы, новых творческих достижений в науке и практике, а также укрепления международных дружеских связей и контактов.

С уважением,  
Организационный комитет конференции.

**Секция 1**  
**ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ**  
**МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА**

**К 50-ЛЕТИЮ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ**  
**И НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**  
**В ПОЛОЦКОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ УНИВЕРСИТЕТЕ**

***Н.Н. ПОПОК***

***Полоцкий государственный университет, Беларусь***

Истоки технического образования на Полотчине нисходят, пожалуй, ко времени существования Полоцкого иезуитского коллегиума, когда в 1729 гг. была допущена астрономия, в 1730 г. – физика, а в 1783 г. – архитектура. Наиболее яркой фигурой этого периода был уроженец Вены Габриэль Грубер (1740–1805 гг.), придворный физик австрийского императора Иосифа II Габсбурга. Переехав в Полоцк (1784 г.), Г. Грубер организовал музей, в корпусах которого разместил лаборатории и физико-механический кабинет. В физической части музея находились электрические машины, механические оптические и технологические приборы и оборудование. При изучении механики была возможность ознакомиться с устройством и работой машины для забивания свай. Большинство механизмов было изготовлено в Полоцке, причём многие из них под руководством Г. Грубера.

Поэтому неслучайно в 1862 г. Полоцкий кадетский корпус, основание которого было заложено в иезуитском коллегиуме, окончили известные в технических науках учёные, например, Виктор Львович Кирпичёв, профессор механики, основатель и первый ректор Харьковского технологического института (ныне НТУ «ХПИ») и Киевского политехнического института (ныне НТУУ «КПИ»), организатор и первый ректор Санкт-Петербургского электротехнического института Николай Григорьевич Писаревский.

В XIX–XX веках была создана сеть специальных учебных заведений в г. Полоцке: лесной (1912 г.), аграрно-экономический (1951 г.), торгово-технологический (1959 г.) техникумы и, конечно же, учительская семинария (1872 г.), позднее – училище, колледж, а с 1953 по 1959 гг. – педагогический институт им. Ф. Скорины. В Новополоцке был открыт нефтяной (1963), позднее (1987) получившей название политехнический техникум, где выпускаются, в том числе и машиностроители. Именно на базе Новополоцкого нефтяного техникума в 1968 году был создан Новополоцкий филиал Белорусского политехнического института (НФ БПИ), позднее (1969 г.) Новополоцкий филиал Белорусского технологического института

(НФ БТИ) и в 1974 году – Новополоцкий политехнический институт (НПИ), второй политех Беларуси.

Открытию вуза в г. Новополоцке способствовало бурное развитие промышленности – Новополоцких заводов «НПЗ» и «Полимир», Полоцких «Стекловолокно», авторемонтного и литейного заводов, позже Новополоцкого завода «Измеритель», а также Витебских станкостроительных заводов им. Кирова, «Коминтерна» и заточных станков, станкостроительного и инструментального заводов в г. Орше, и других, которые испытывали острую потребность в инженерных кадрах. Примечательно, что приказ об открытии НФ БПИ визировали Лев Степанович Ляхович (1919–1990г.г.), д.т.н, профессор и Петр Иванович Ящерицын (1915–2005), академик НАН Беларуси, профессор, доктор технических наук, известный ученый в области технологии машиностроения и обработки материалов резанием, в то время ректор Белорусского политехнического института. П.И. Ящерицын оказал большое влияние на подготовку высококвалифицированных кадров и формирование научных направлений по машиностроению в Полоцком государственном университете.

В 1969 г. была образована кафедра «Технология конструкционных материалов» и в 1970 году осуществлён набор по специальности «Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты». В 1975 году из кафедры «Технологии конструкционных материалов» была выделена кафедра «Технология машиностроения» и организован машиностроительный факультет, состоялся первый выпуск инженеров-механиков. В дальнейшем в связи с развитием машиностроительной отрасли происходила реорганизация выпускающих машиностроительных кафедр: в 1980 году из кафедры «Технология машиностроения» выделена кафедра «Металлорежущие станки и инструменты»; в 2008 году вновь состоялось объединение кафедр и создана кафедра «Технология и оборудование машиностроительного производства»; в 2014 году на базе кафедры «Технологии конструкционных материалов» создана кафедра «Автомобильного транспорта». Также претерпели изменения состав и наименование факультета: вначале с 1971 года механико-технологический, 1975 года машиностроительный, затем с 2014г. факультет машиностроения и автомобильного транспорта, а с 2017 года – вновь механико-технологический факультет, также изменился набор специальностей I ступени образования, по которым готовились инженеры:

1-36 01 01 «Технология машиностроения»;

1-36 01 03 «Технологическое оборудование машиностроительного производства»;

1-36 01 06 «Оборудование и технология сварочного производства»;

1-36 01 04 «Технология и оборудование высокоэффективных процессов обработки материалов»;  
1-37 01 06 «Техническая эксплуатация автомобилей»;  
1-37 01 07 «Автосервис»;  
1-44 01 02 «Организация дорожного движения»;  
1-36 07 02 «Производство изделий на основе трёхмерных технологий».

По II ступени образования обучаются магистранты по следующим специальностям:

1- 36 80 03 «Машиностроение и машиноведение»;  
1-36 80 04 «Обработка конструкционных материалов в машиностроении»;  
1-36 81 01 Инновационные технологии в машиностроении;  
1-37 81 02 «Создание многофункциональных колёсных и гусеничных машин»;  
1- 36 81 02 «Сварочные и родственные технологии в промышленности».

Аспирантура ведёт подготовку инженеров исследователей по следующим специальностям:

05.02.08 «Технология машиностроения»; 0  
5.02.07 «Технологии и оборудование механической и физико-технической обработки».

За все время существования машиностроительного факультета защищено 9 докторских диссертаций, в т.ч. 4 – выпускниками факультета. Диссертации защитили: Ф.И. Пантелеенко, В.И. Коробко, В.Н. Коровкин, В.П. Иванов, В.Я. Прушак, М.Л. Хейфец, Н.Н. Попок, В.А. Данилов, В.М. Константинов. Ф.И. Пантелеенко и В.Я. Прушак избраны членами-корреспондентами НАН Беларуси. Присвоено звание профессора канд. техн. наук Б.П. Чемисову, канд. техн. наук А.И. Голембиевскому, канд. техн. наук Ю.П. Ощепкову.

Созданы научные школы и направления:

- материаловедение (проф. Ю.П. Ощепков);
- самофлюсующиеся сплавы на железной основе (чл.-кор. НАН Беларуси Ф.И. Пантелеенко);
- материаловедение сплавов для упрочняющих покрытий (проф. В.М. Константинов, доц. А.Л. Лисовский);
- электроферромагнитное упрочнение деталей машин (проф. Б.П. Чемисов, доц. А.В. Абрамова);

- мобильное производство на основе модульных технологий и оснастки (проф. Н.Н. Попок);
- плазменная эмиссионная электроника (проф. В.А. Груздев, доц. В.Г. Залесский);
- интенсификация процесса обработки сложных поверхностей деталей (проф. В.А. Данилов, доц. Р.А. Киселев);
- системология зубонарезания (проф. Голембиевский А.И.);
- технологические комплексы (проф. М.Л. Хейфец);
- механика прочности деталей машин (доц. В.Э. Завистовский);
- механика жидкостей и газов (проф. В.И. Коробко, проф. В.Н. Коровкин);
- организация ремонтного производства (проф. В.П. Иванов, доц. Вегерина Т.В.);
- горное машиностроение (чл.-кор. НАН Беларуси В.Я. Прушак).

Техническая наука в университете начиналась с образования технических кафедр и развивалась вместе с ними. Первый заведующий кафедрой технических дисциплин Ю.П. Ощепков (1969 г.) занимался металловедением и создал направление, связанное с изучением структур и свойств металлов и их совершенствованием. Впоследствии это вылилось в 30-летний опыт сотрудничества с предприятиями нефтехимической отрасли в области восстановления и упрочнения деталей машин. Этой же проблемой занимался Николай Васильевич Спиридонов, создавший первую в Республики Беларусь отраслевую лабораторию, имеющую союзное подчинение. Впоследствии Н.В. Спиридонов, д.т.н., профессор работал на кафедре «Технологии машиностроения» БНТУ.

Одним из первых преподавателей филиала Г.М. Макаренко на Полоцком авторемонтном заводе была создана лаборатория по плазменной обработке. Кстати, первые студенты-машиностроители В.Э. Завистовский и Н.Н. Попок получили навыки научной работы именно у Ю.П. Ощепкова и Г.М. Макаренко.

В направлении упрочняющих технологий работали Владимир Владимирович Кузнецов (1970 г.) и Семен Владимирович Ярмолевич, защитившие кандидатские диссертации в институте надежности и долговечности машин. НАН Беларуси с 1984 по 2010 гг. С.В. Ярмолевич возглавлял кафедру начертательной геометрии и графики.

Ф.И. Пантелеенко, получивший в 1972 г. распределение в филиал БТИ (Новополоцк), под руководством проф. Леонида Григорьевича Ворошнина (БПИ, ныне БНТУ) защитил кандидатскую, а затем докторскую



диссертации в области создания самофлюсующихся материалов на железной основе и защитных покрытий из них. Научная школа чл.-кор. НАН Беларуси Ф.И. Пантелеенко взрастила целую плеяду ученых, работающих в этом направлении: д-р техн. наук Валерий Михайлович Константинов, канд. техн. наук Александр Леонидович Лисовский, канд. техн. наук Андрей Станиславович Снарский, канд. техн. наук Олег Петрович Штемпель, канд. техн. наук Виктор Александрович Фруцкий, канд. техн. наук Сергей Николаевич Жабурёнок и др. Научные работы Ф.И. Пантелеенко нашли практическое воплощение в том числе в диагностике нефтяных трубопроводов и емкостей.

В это же время с кафедры Л.Г. Ворошнина (БПИ-БНТУ) в Новополоцк прибывает канд. техн. наук Алексей Михайлович Долгих, специализирующийся в области инструментальных сталей и впоследствии развивающий направление химико-термической обработки материалов.

Прибывшие в НПИ из Калининграда Б.П. Чемисов, В.И. Абрамов, И.Т. Сычев сформировали научное направление электроферромагнитного упрочнения деталей, которое координировал академик НАН Беларуси Евмений Григорьевич Коновалов, работавший в физико-техническом институте НАН Беларуси. По этому направлению были защищены кандидатские диссертации Б.П. Чемисовым и В.И. Абрамовым, выполнены первые дипломные проекты В.Э. Завистовским и Н.Н. Попок. Кстати, В.К. Липский, также прибывший из Калининграда, руководил студенческой лабораторией по электрогидравлическому упрочнению деталей; под его руководством по этой тематике был выполнен и защищен дипломный проект Б.И. Сосновиком. В.К. Липский д.т.н., профессор способствовал становлению как ученого выпускника машиностроительного факультета Ю.Г. Грозберга, ныне декана радиотехнического факультета, и многих других.

Научное направление в области упрочнения и восстановления деталей машин нашло свое продолжение в тесном сотрудничестве с институтом надежности и долговечности машин (ныне ГНУ «Объединенный институт машиностроения») НАН Беларуси, благодаря которому защитили диссертации выпускники НПИ: В.Э. и С.Э. Завистовские, А.А. Лысов, А.С. Аршиков, А.В. Дудан, М.Л. Кипервассер, Н.Н. Петюшев, В.М. Изоитко, А.В. Федоровичус, А.Л. Худолей и др. Координировал это направление чл.-кор. НАН Беларуси Нил Николаевич Дорожкин. Всего же выпускниками машиностроительного факультета НПИ-ПГУ защищено более 30 кандидатских диссертаций.

Выпускник НПИ (1976 г.) Виктор Яковлевич Прушак, начинавший заниматься наукой в сфере технологии машиностроения, защитил кандидатскую и докторскую диссертации и был избран членом-корреспондентом НАН Беларуси в области исследования и разработки геотехнологий и горной техники.

Наряду с металловедением, упрочняюще-восстанавливающим и технологическим направлениями в институте развивалось научное направление, связанное с обработкой материалов резанием. Его инициировал Юрий Агафьевич Новоселов, прибывший из г. Куйбышева (ныне г. Самара), аспирант известного ученого, позднее ректора Тольятинского политехнического института, профессора Арона Наумовича Резникова. Ю.А. Новоселов развивает исследования в области тепловых явлений при резании, в частности при фрезеровании.

Исследовались новые способы обработки и инструменты – фрезоточение, сборные резцы и т.д., упорядочивалась терминология резания. В 1983 г. в тесном сотрудничестве с известным ученым профессором Г.И. Грановским (МГТУ им. Н.Э. Баумана), университетом Дружбы народов им. Патриса Лумумбы и Госстандартом СССР были выпущены три ГОСТа СССР, которые и сегодня определяют терминологию науки о резании материалов.

Из г. Владимира в НПИ прибыл ещё один аспирант школы А.Н. Резникова Владимир Александрович Петров, защитивший кандидатскую диссертацию по ротационному подрезанию торцов труб. В.А. Петров – специалист поистине энциклопедических знаний, много сделал для становления кафедр технологии машиностроения и металлорежущих станков.

Формированию направления ротационного резания способствовал прибывший из аспирантуры ФТИ НАН Беларуси Евгений Михайлович Найдёнышев (диссертация по ротационному растачиванию). По этому направлению впоследствии были защищены кандидатские диссертации выпускниками НПИ Н.Н. Попок и М.Л. Хейфецем.

Научное направление в области резания материала развивали Виктор Алексеевич Данилов и Анатолий Иосифович Голембиевский, прибывшие из г. Калининграда. В.А. Данилов уже на тот момент состоялся как ученый в области контроля сложнопрофильных поверхностей деталей. Впоследствии он занимался ротационным резанием, обработкой некруглых валов, шлицевых и зубчатых контуров и создал научную школу по интенсификации процесса резания сложных поверхностей.

А.И. Голембиевский защитил диссертацию по поверхностному пластическому деформированию деталей в ФТИ НАН Беларуси, занимался

тангенциальным резанием и исследовал эффект затирания при зубодолблении, развивает научную школу по системологии зубонарезания.

Прибывший из Томска (1993 г.) доктор технических наук, профессор Владимир Алексеевич Груздев, сформировал научный коллектив и создал научную школу по направлению обработки материалов плазменноэмиссионными электронами, которая успешно развивается в тесном содружестве с ФТИ НАН Б и кафедрами машиностроительного факультета. По его инициативе организован Совет по защите диссертаций К 02.19.02 «Электрофизика и электрофизические установки». Успешно защитили кандидатские диссертации В.Г. Залесский, Ю.П. Голубев, О.П. Петрович, Д.А. Антонович и др. Впоследствии В.Г. Залесский защитил докторскую диссертацию и ныне возглавляет ФТИ НАН Беларуси.

Также надо отметить научно-исследовательские работы по алмазной обработке материалов (науч. руководители: А.А. Лысов, А.С. Аршиков) и абразивной обработке ленточным инструментом (науч. руководитель С.Э. Завистовский).

Через научные школы машиностроительного факультета и Совет по защите диссертаций, возглавляемый Ф.И. Пантелеенко, прошли многие производственники: директор ОАО «Проммашремонт», канд. техн. наук Владимир Иванович Семёнов, директор ОАО «Белкард» (Гродно), канд. техн. наук Виктор Иванович Кравченко и многие другие.

Сочетание технологических и физических направлений исследований позволило сформировать научные направления по мобильному производству, основанному на модульных технологиях, быстроперестраиваемом технологическом оборудовании и оснастке (науч. руководитель Н.Н. Попок), а также проектированию технологических комплексов (науч. руководитель М.Л. Хейфец). Способствовал развитию этих направлений и координировал их академик НАН Беларуси П.И. Ящерицын.

Уникальность научной школы в области мобильного развития машиностроительного производства состоит в том, что она формировалась на базе научных школ представителей различных городов Советского Союза и впитала в себя лучшие их достижения. Наиболее существенный вклад в создание школы внес академик НАН Беларуси Петр Иванович Ящерицын - известный ученый в машиностроении и обработке металлов резанием. За время существования школа защищено 4 кандидатских и 3 докторских диссертации, более 30 магистерских диссертаций. Научная школа активно развивается. Об этом свидетельствуют выполняемые задания в государственных программах научных исследований, в том числе фундаментальных, которые завершены

внедрением разработок в производства ряда станкостроительных и инструментальных предприятий Республики Беларусь.

Научная школа участвует в выполнении заданий государственной программы инновационного развития Республики Беларусь на 2016—2020гг. по созданию и развитию технопарка Полоцкого государственного университета, в международных проектах с Литовским инновационным центром. Изданы многочисленные монографии и статьи в рецензируемых журналах, получены патенты на изобретения. Регулярно с интервалом в два года проводятся международные научно-технические конференции «Инновационные технологии в машиностроении» с участием ученых России, Украины, Литвы, Латвии, Польши, Германии.

Постоянно совершенствуется материально-техническая база исследований. За последние годы приобретен ряд современных металлорежущих станков с ЧПУ и вакуумная установка для ионно-плазменной обработки изделий, современная измерительная аппаратура и приборы для точного измерения линейных размеров (видеоизмерительный микроскоп «Norgau NVM-4030D»), температуры (пирометр «Optris»), шероховатости поверхности (профилограф-профилометр «Abris») и т.д.

Но главное достижение научной школы – это преемственность ее учеников и последователей. В 2018 г. защищена кандидатская диссертация Р.С. Хмельницким. Ежегодно в научных кружках занимаются более 10 студентов, 2-3 студента участвуют в выполнении госбюджетной тематики, выполняется порядка 3-5 дипломных проектов по научно-исследовательским темам, до 10 студентов участвуют в студенческих конференциях, в т.ч. на английском языке.

В настоящее время по машиностроительным специальностям обучается в аспирантуре – 5 человек, в магистратуре – 10 человек. По результатам Республиканского конкурса научных работ в 2017-2019 году лауреатом стал магистрант, а ныне аспирант В.С. Анисимов, I категории удостоены работы студентов и магистрантов Башлачёва Д.А., Пуймана Е.В., Жихорева Е.О., Тихон Е.М. В 2019 г. открыта магистратура по специальности «Инновационные технологии в машиностроении». Еще большую привлекательность для молодых ученых придает открытие такой перспективной специальности, как «Производство изделий на основе трехмерных технологий». Современные методы обучения студентов и освоение ими цифровых технологий позволят еще больше увеличить количество молодых людей, желающих заниматься наукой.

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОМПЛЕКСОВ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ  
АДДИТИВНОГО И СУБТРАКТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА**

**Б.М. БАЗРОВ**

*Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия*

**М.Л. ХЕЙФЕЦ**

*ОАО «НПО Центр» НАН Беларуси, Минск, Беларусь*

**С.А. ЧИЖИК**

*Институт тепло- и массообмена им А.В. Лыкова НАН Беларуси,  
Минск, Беларусь*

*Проведен анализ состояния и перспектив развития технологического оборудования для субтрактивного и аддитивного компьютеризированного производства, позволивший показать новую парадигму его эволюции. Предложена диаграмма логических связей в процессах аддитивного производства, представляющая собой конечный автомат, которая может использоваться как для построения 3D-принтера, осуществляющего «выращивание» изделия сложной формы и структуры, так и для аддитивного синтеза его композиционного материала.*

Исходными данными для проектирования технологического оборудования является техническое задание конкретного заказчика, содержащее:

1. Данные о материалах и готовых изделиях.
2. Производительность оборудования, характер и тип производства.
3. Уровень автоматизации и встраиваемость в современное производство.

Последовательность расчета технологического оборудования для традиционного субтрактивного производства включает укрупненные стадии:

1. Компоновка (выбор кинематической схемы).
2. Модульное построение (ограничительный набор агрегатов и узлов).
3. Расчеты статических упругих перемещений (выбор схемы и прочностные расчеты).
4. Динамические расчеты устойчивости движений системы и статических отклонений элементов (выбор схемы и динамические расчеты).
5. Тепловые расчеты (выбор термодинамической схемы и расчет температур).

6. Точностные расчеты (определение точности геометрических и кинематических связей с учетом деформации).

7. Расчеты надежности (определение надежности агрегатов и узлов, экономическое обоснование надежности).

8. *Анализ человеко-машинной системы* (охрана труда и техника безопасности).

Далее по стадиям производится расчет основных систем технологического оборудования: 1) несущих систем; 2) направляющих движений; 3) приводов движений и др.

Проектирование и расчет основных систем технологического оборудования производится по техническим требованиям к механическим агрегатам, технологической оснастке и средствам автоматизации; системам смазки, электрооборудованию и программируемым системам; системам диагностики, с учетом техники безопасности, эргономики и технологичности станка. Для этого в первую очередь строятся схемы (согласно нумерации стадий): кинематическая (1), прочностная (3), динамическая (4), термодинамическая (5), контакта и трения (6), изнашивания и надежности (7).

Построение ведется как с учетом ограничительного набора агрегатов и узлов – по модулям (2), так и на базе анализа человеко-машинной системы (8) в целом.

Однако, для компьютеризированного аддитивного производства, этих стадий и соответствующих им схем недостаточно. Сущность аддитивного производства заключается в послойном синтезе или «выращивании» изделий по «цифровым моделям» без использования формообразующей оснастки. Создание формы изделия происходит путем добавления материала, в отличие от традиционных технологий, основанных на удалении «лишнего» материала.

Различают две основные группы аддитивных методов:

1) с «предварительным формированием слоя» материала по технологиям *BD (Bed Deposition)*, подразумевающим наличие определенной платформы, на которой послойно «выращивается» материал и изделие;

2) «непосредственное осаждение слоя» материала на сложнопрофильную поверхность изделия по технологиям *DD (Direct Deposition)*.

В настоящее время методы аддитивного производства классифицируются следующим образом по стандарту ISO/ASTM 52900-15:

1. *Vat Photopolymerization* – фотополимеризация в емкости;

2. *Material Jetting* – разбрызгивание материала или струйные технологии;

3. *Material Extrusion* – выдавливание материала;
4. *Powder Bed Fusion* – плавление материала в заранее сформированном слое;
5. *Binder Jetting* – разбрызгивание связующего вещества;
6. *Sheet Lamination* – соединение листовых материалов;
7. *Directed Energy Deposition* – прямой подвод энергии непосредственно в место построения.

Классификации по принципам получения изделий без формообразующей оснастки соответствуют, согласно представленной последовательности, созданные уже более 30 лет назад «традиционные» методы:

1. *Stereolithography Application (SLA)* – стереолитография;
2. *Solid Ground Curing (SGC)* – послойное уплотнение материала;
3. *Fused Deposition Modeling (FDM)* – послойное экструдирование расплава;
4. *Selective Laser Sintering (SLS)* – селективное лазерное спекание;
5. *Direct Shell Part Creation (DSPC)* – прямое создание литейных форм;
6. *Laminated Object Manufacturing (LOM)* – послойное ламинирование из листового материала; а также другие методы, сегодня не столь распространенные в производстве.

Широко используемые в мировом производстве технологии послойного синтеза позволяют заключить, что наиболее перспективно применение новых аддитивных технологий создания слоев и формообразования изделий, использующих различные сочетания материалов и источников энергии. Это в свою очередь ставит задачи распределения компонентов материалов и потоков энергии не только по заданному контуру или поверхности, но и по глубине от поверхности изделия, а также по характеру импульсов подачи энергии и материала.

Если рассматривать аддитивное технологическое оборудование с позиций компьютеризации производственной деятельности, то 3D-принтеры – печатающие машины, их узлы и детали следует проектировать как устройства компьютерной периферии, построенные по той же архитектуре, что и ЭВМ.

Поэтому для моделирования 3D-печати и разработки технологического оборудования аддитивного производства прежде всего необходимо:

- 1) предложить *диаграмму связей* в процессах «выращивания» изделий, представляющую собой *конечный автомат*;
- 2) трансформировать в *клеточную машину* с ограниченным числом состояний и правил перехода предложенный конечный автомат;

3) сформировать *конфигурации из клеток* конечного блока *клеточных машин* для различных процессов «выращивания» изделий;

4) рассмотреть *мозаичные структуры*, формируемые различными конфигурациями клеток, в зависимости от их состояний и *правил перехода*.

Диаграмма логических связей в процессах аддитивного производства представляет собой конечный автомат. Приняв за функциональные состояния технологической системы различные способы наращивания слоев, строится кинетическая схему конечного автомата при: I) прямом получении деталей; II) послойном синтезе; III) быстром прототипировании; IV) формировании трехмерных объектов.

Представив блок-схемами совокупности режимов для каждого функционального состояния, получают алгоритмические схемы состояний технологической среды. После соединения алгоритмических схем состояний строится клеточная машина технологической среды при «выращивании» изделий.

Рассматривая взаимосвязи состояний конечного автомата, получают граф состояний клетки-элемента технологической среды.

Конфигурации клеточных машин, отражающие их потактовые возбуждения, представленные графами состояний клеточных автоматов технологической среды, описывают поведение элементов мозаичной структуры при «выращивании» изделий.

В результате граф состояний автомата может быть эффективно использован для описания функциональных состояний элементарных клеток технологической среды.

Таким образом, при проектировании технологии аддитивного синтеза применяются как методы формообразования деталей из композиционных материалов, использующие потоки энергии и компонентов материала, так и методы автоматизации и управления процессами оперативного макетирования и производства изделий.



# ANALYSIS OF INDUSTRY DIGITIZATION OPPORTUNITIES IN LITHUANIA

*Daiva Bičkauskė, Artūras Jakubavičius, Mantas Vilys*  
*Lithuanian innovation centre, Vilnius, Lithuania*

*In the context of globalization, fast-moving technologies and a rapidly evolving economy have triggered a new wave of change. Generally known as the Industry 4.0, it has been announced to underline the new industrial revolution. The biggest focus is on formulating the Industry 4.0 concept aiming to distinguish and articulate the main characteristics of digitization, comparing Lithuanian production trends in the context of digitization*

**Introduction.** In scientific articles, authors emphasize the importance of digitization in production [1],[2]. They claim that companies need to implement the latest technology. The fourth industrial revolution will have a monumental impact on the global economy, so vast and multifaceted that it makes it hard to disentangle one particular effect from the next [3]. A non-innovative company is doomed to be pushed out of the market. The fourth industrial revolution is already beginning to change production processes, business models, and personal life.

Desires to digitize all processes horizontally (through all components that create value) and vertically (through all levels of automation). Concepts such as the Internet of Things, a smart factory, cyber systems enable the implementation of the fourth revolution. Majority of the entrepreneurs recognize the concept of Industry 4.0 as a great opportunity for development and improvement in competitiveness[4]. The strengthening of digitalization processes in EU industry may put additional competitiveness pressures on Lithuanian manufacturing businesses. In order to maintain the competitiveness of Lithuanian industry, steps towards the digitalization of industry has to be implemented. Digitization offers the potential for quality improvement, flexibility and productivity [5].

**The concept of the Industry 4.0.** The industry is a part of the economy producing material goods that are mechanized and automated[6]. The future vision of the fourth industrial revolution includes modular and efficient production systems, characterized by scenarios in which products control their own production processes. The idea should realize individual production in small series, while maintaining the same economic benefits as mass production. Products in the factories will communicate with the environment and will affect the configurable systems[7].

Heiner [8] states that there are two main factors that determine the development of the new industrial revolution. The first factor is the "pull" of application, driven by the need for change. This factor is caused by social, economic and political factors:

- *Individualization on demand*: market breakthrough from seller to buyer.
- *Flexibility*: The new system requirements require a flexible product development process. The manufacturing cycle must be adaptive and flexible.
- *Short development times*: new technology, product development time must be shortened. Ugerman [9] also adds that this factor must improve and even change technology, but also people's thinking.
- *Decentralization*: faster decision-making by companies to cope with specific tasks requires the abandonment of a hierarchical organizational system.
- *Resources management*: Shrouf [10] argue that resource management needs to be more sustainable in managing resource depletion, increased prices, as well as changing social attitudes towards ecology.

On the other hand, the industry is undergoing a technological boost. This technological push has already affected people's personal lives. However, in an industrial context, innovative technologies are just beginning to enter the value chain, therefore we can identify technologically-driven advancement methods:

- *Digitization and Networking*: The ever-increasing digitization of production and production tools leads to an increasing database of actuators and sensors that supports control and analysis functions. It leads to a fully digitized environment. Lee and Kao [11] describe products as information carriers that are linked to other product modules and to the production process.
- *Increase in automation and mechanization*: more and more technical assistance will be used in the work process to facilitate physical work. Strandhagen [12] suggests that automation will have a major impact on transport, such as automated stand-alone chassis that will transport products in the factors.
- *Miniaturization*: There is a tendency to minimize everything. Even 15 years ago, in order to be able to control robots, controllers and computers occupied a lot of space in workplaces, now computers with high-speed speed and responsibility can be plugged into a human pocket.

#### **Operative analysis of Lithuania in relation to Industry 4.0**

While Lithuanian manufacturing industry is enjoying a period of dynamic growth, rapidly rising labour costs and lagging productivity as well as dominance of low value-added technology sectors in manufacturing systems in Lithuania's put considerable pressure on the competitiveness of the Lithuanian man-

ufacturing sector. Strengthening automation processes in EU industry can lead to additional competitive pressure on Lithuanian manufacturing companies.

The EU Digital Scoreboard [13] assesses the activities of the EU and its Member States in many areas, from communication and digital skills to the digitization of businesses and public services. The Scoreboard analyzes the country's performance through over 150 different digital economy and societal indicators.

The share of the manufacturing sector in GDP is used as an indicator to determine how the manufacturing sector, which is critically important to the Lithuanian economy, has developed. Manufacturing is the largest sector of the Lithuanian economy, generating 20.4% of Lithuanian Gross Domestic Product. Manufactured goods account for more than 80% of total exports of Lithuanian goods and services. Since the end of the global financial crisis, Lithuanian manufacturing production has expanded by 62% and is already significantly above the pre-crisis level. This expansion was driven by several factors. First of all, after the global financial crisis, Lithuanian manufacturing has significantly increased its attention on expansion into foreign markets. Secondly, gradual recovery in the EU region, which accounts for 80% of exports of goods of Lithuanian origin. Lastly, increased integration of Lithuanian manufacturing industry into the EU manufacturing value chains, coupled with an increased number of manufacturing businesses in Lithuania.

Thus, while Lithuania has a stable share of production in GDP, with the rapid growth of production in Europe, Lithuania's production lags behind the selected countries due to the implementation of “innovative production”. In fact, Eurostat data shows that in 2017 Lithuania had the lowest share of high value-added tech in manufacturing industry in the EU.

Lithuania exports are heavily dominated by export of goods (manufactured by industrial businesses), which account to almost 80% of total export of goods and services. In comparison with other EU member states, Lithuania stands out as the country with particularly significant share of export of goods in GDP (62% of GDP). Lithuanian manufacturing, which is heavily linked with export markets, has been growing dynamically ever since 2010. In the last 5 years alone, manufacturing output rose by almost a third and is 34% above the precrisis level.

Unemployment in the industry was 21489 positions (2018) [14]. Meanwhile, vacancies in the industry amounted to 21.5%. The main reason why vacancies are not filled despite a high unemployment rate could be that a typical unemployed person is underqualified. This shows that, in order to fill vacant jobs in the industry, it is necessary to have a higher qualification (almost 57% of

job offers are for skilled workers). This trend will continue in the coming years, unskilled workers will be replaced by machines.

66% of employers from industry surveyed claimed they face a challenge to find employees. This creates additional costs and prevents companies from expanding their business more quickly. Although appropriate education, qualifications, and work experience are needed and valued by the employer, personal characteristics are no less important - motivation, ability to quickly adapt to innovation and experience are the most important factors when choosing an employee. Continuing lifelong learning, skills development (especially digital skills) will continue to be crucial in the industry.

**Conclusion.** Lithuania stands quite high (20,4%) in the size of the manufacturing sector and occupy leading positions (higher than the EU average 15%). Also, Lithuania managed to sustain or increase the share of manufacturing in GDP. In regard to the structure of the manufacturing sector, Lithuanian manufacturing is heavily dominated by the medium-low and low-tech sector, while in many other countries' economies, half of their manufacturing output is generated by the medium-high and high-tech sectors. Lithuania had the lowest share of high-tech industry in manufacturing output in the whole EU.

Growth in manufacturing output and labor working in this sector was noticed; however, it can be a sign of lagging investment into digitalization by Lithuania manufacturers. There are signs that businesses in Lithuania underinvest in digitalization processes. However, in order to remain competitive, companies will have to rethink their strategies concerning future investments.

## REFERENCES

- [1] Wang, S., Wan, J., Zhang, D., Li, D., & Zhang, C. (2016). Towards smart factory for industry 4.0: a self-organized multi-agent system with big data based feedback and coordination, 101, 158–168. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2015.12.017>
- [2] Qin, J., Liu, Y., & Grosvenor, R. (2016). A Categorical Framework of Manufacturing for Industry 4.0 and Beyond. *Procedia CIRP*, 52, 173–178. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.08.005>
- [3] Klaus S., *The Fourth Industrial Revolution: what it means, how to respond*, World Economic Forum, 2016.
- [4] Ślusarczyk, B. (2018). Industry 4.0 – Are we ready? *Polish Journal of Management Studies*, vol. 17, no. 10, pp. 232–248.
- [5] Hoellthaler, G., Braunreuther, S., & Reinhart, G. (2018). Digital Lean Production: An Approach to Identify Potentials for the Migration to a Digitalized Production System in SMEs from a Lean Perspective. *Procedia CIRP*, 67, 522–527. <https://doi.org/10.1016/J.PROCIR.2017.12.255>

[6] Lasi, H., Kemper, H.-G., Feld, D.-I. T., & Hoffmann, D.-H. M. (n.d.). BISE-CATCHWORD.

[7] Brettel M., Friederichsen N., Keller M., M. R. (n.d.). How Virtualization, Decentralization and Network Building Change the Manufacturing Landscape: An Industry 4.0 Perspective

[8] Heiner L., Fettke P., Kemper H.G., Feld T., Hoffmann M. Industry 4.0. Business&Information Systems Engineering: The International Journal WIRTSCHAFTSINFORMATIK 6:239–42, 2014.

[9] Ungerman, O., Dedkova, J., & Gurinova, K. (2018). THE IMPACT OF MARKETING INNOVATION ON THE COMPETITIVENESS OF ENTERPRISES IN THE CONTEXT OF INDUSTRY 4.0, 10(2), 132–148. <https://doi.org/10.7441/joc.2018.02.09>

[10] Shrouf, F., Ordieres, J., & Miragliotta, G. (2014). Smart Factories in Industry 4.0 : A Review of the Concept and of Energy Management Approached in Production Based on the Internet of Things Paradigm, 697–701.

[11] Lee, J., Kao, H., & Yang, S. (2014). Service innovation and smart analytics for Industry 4.0 and big data environment. Procedia CIRP, 16, 3–8. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.02.001>

[12] Strandhagen, J. W., Alfnes, E., Strandhagen, J. O., & Vallandingham, L. R. (2017). The fit of Industry 4.0 applications in manufacturing logistics: a multiple case study. Advances in Manufacturing. <https://doi.org/10.1007/s40436-017-0200-y>

[13] EU Digital scoreboard, 2017 Statistics [online]. [cit.2019-09-18].

[14] OECD (2018). Job Creation and Local Economic Development 2018: Preparing for the Future of Work. 3. Paris: OECD Publishing. DOI: <https://doi.org/10.1787/9789264305342-en>

## **ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ИЗГОТОВЛЕНИЕ СОВРЕМЕННОГО СТРЕЛКОВОГО ОРУЖИЯ ДЛЯ СПОРТИВНЫХ СОРЕВНОВАНИЙ И ДОБЫЧИ ОБЪЕКТОВ ЖИВОТНОГО МИРА**

**О.В. СИЛЬВАНОВИЧ, А.И. ГУТКОВСКИЙ, Ю.Г. ПАТАШКОВ**

**ООО «БСВТ-новые технологии» Минск, Беларусь**

**В.И. БОРОДАВКО, М.Л. ХЕЙФЕЦ, Н.Л. ГРЕЦКИЙ**

**ОАО «НПО «Центр» НАН Беларуси, Минск, Беларусь**

*В статье показано проектирование изготовление и испытание опытных образцов охотничьих винтовок калибра 308Win (7,62x51) и калибра 223Rem (5,56x45). Описаны основные требования, предъявляемые к современному стрелковому оружию для спортивных соревнований и добычи объектов животного мира.*

Отсутствие серийного производства стрелкового оружия в Республике Беларусь, в частности, охотничьего и спортивного, вызывает дополнительные затраты сил и средств у профильных организаций и рядовых потребителей на его приобретение и обслуживание. Возможность организации серийного производства охотничьих и спортивных винтовок в ООО «БСВТ-новые технологии» (далее – хозяйственное общество) позволит снизить затраты сил и средств у профильных организаций и рядовых потребителей за счет исключения логистической составляющей, а так же проводить техническое обслуживание и ремонт данных изделий.

С целью выполнения поставленных задач по организации серийного производства современного стрелкового оружия в хозяйственном обществе была проведена следующая работа:

- изучение рынка стрелкового оружия для определения технических параметров предъявляемых к наиболее востребованному спортивному и охотничьему оружию;
- изучение и анализ технологических и производственных возможностей хозяйственного общества;
- разработка проекта конструкторской (КД) и эксплуатационной документации (ЭД) на два опытных образца винтовки калибра 308Win (7,62x51) и калибра 223Rem (5,56x45);

- изготовление двух опытных образцов винтовки охотничьей калибра 308Win (7,62x51) и калибра 223Rem (5,56x45);
- проведение испытания изготовленных опытных образцов;
- анализ результатов испытаний опытных образцов;
- разработка проекта технических условий (ТУ) для последующей постановки продукции на серийное производство.

Изучение рынка стрелкового оружия и возможности экспорта позволило выявить наиболее востребованные калибры (308Win (7,62x51) и 223Rem (5,56x45)) и технические требования, предъявляемые к опытным образцам охотничьих винтовок (таблица 1).

Таблица 1. – Основные технические требования, предъявляемые к опытным образцам охотничьих винтовок

Технические требования	Параметр данных для калибра 308Win (7,62x51)	Параметр данных для калибра 223Rem (5,56x45)
Калибр, (мм)	308Win (7,62x51)	223Rem (5,56x45)
Вместимость магазина, шт. патронов	3	3
Длина винтовки, мм, не более	1230	1080
Масса винтовки без патронов, кг, не более	5,9	5,0
Усилие спуска, Н, в пределах	9.8 - 19.6	9.8 - 19.6
Радиус рассеивания при стрельбе на 100м:		
- охотничьими патронами, мм, не более;	60	60
- спортивными патронами, мм, не более;	30	30

Изучение и анализ технологических и производственных возможностей хозяйственного общества показал, что собственное производство имеет необходимый оборудованный сборочный участок и универсальное оборудование для механической обработки, позволяющее изготовить основные детали и осуществить общую сборку охотничьей винтовки.

Разработка проекта КД и ЭД на два опытных образца винтовки была выполнена с учетом требований [1, 2] и особенностей технологических и производственных возможностей хозяйственного общества.

По разработанной КД на собственном производстве были изготовлены комплекты требуемых деталей и собраны два опытных образца винтовки охотничьей калибра 308Win (7,62x51) и калибра 223Rem (5,56x45).

Для подтверждения технических характеристик опытных образцов винтовки охотничьей, были проведены соответствующие виды испытаний, разделённых на две части:

- испытания без стрельбы;
- испытания со стрельбой.

Испытания без стрельбы проводились с учетом требований приведенным в проекте ТУ, с учетом требований [1, 2] в части проверки внешнего вида, маркировки, массогабаритных показателей, усилия спуска, наличия дефектов, безопасности без производства выстрела, качества канала ствола и патронника и узла запираания. Проведенные испытания дефектов и неисправностей не выявили.

Испытания стрельбой проводились в специально оборудованном тире, с соблюдением мер безопасности, оговоренных в «Инструкции по проведению испытательных стрельб» №20/18-02.05.18 хозяйственного общества.

Подготовка опытных образцов винтовки для проверки безотказности работы в интервале рабочих температур проводилась в соответствующей лаборатории ОАО «НИИЭВМ». Внешний вид винтовки перед стрельбой при охлаждении до температуры  $-45^{\circ}\text{C}$  показан на рисунке 1.



Рисунок 1. – Внешний вид винтовки перед стрельбой при охлаждении до температуры  $-45^{\circ}\text{C}$

Испытания со стрельбой проводились по требованиям, приведенным в проекте ТУ, с учетом требований [1, 2] в части проверки прочности, правильности функционирования, рассеивания, безотказности работы в затруднённых условиях, безотказности работы в интервале рабочих температур, ресурс, магазина на взаимодействие.

Испытание на определение рассеивания проводились стрельбой на 100 метров сидя с упора с использованием оптического прицела. Для анализа результатов испытания по пробойнам на мишенях определялись радиус круга, вмещающего все пробоины при исключении одной наиболее



оторвавшейся и отклонение средней точки попадания (СТП) от точки прицеливания (таблица 2).

Испытания стрельбой дефектов и неисправностей не выявили.

Таблица 2. – Характеристики рассеивания для опытных образцов винтовки охотничьей.

Параметр	Винтовка калибра 308Win (7,62x51)	Винтовка калибра 223Rem (5,56x45)	Проект ТУ п.1.1.4
R <sub>100</sub> лучшее, мм	35	35	60
СТП <sub>100</sub> лучшее, мм	35	22	не норм.
Примечания: 1. R <sub>100</sub> – радиус круга, вмещающего все пробойны, при исключении одной, наиболее оторвавшейся. 2. СТП <sub>100</sub> – отклонение СТП от точки прицеливания.			

**Выводы.** Испытания опытных образцов охотничьих винтовок калибра 308Win (7,62x51) и калибра 223Rem (5,56x45) показали, что разработанные опытные образцы соответствуют требованиям, предъявляемым к современному стрелковому оружию, и могут быть использованы для организации серийного производства в хозяйственном обществе.

Результаты проведенной работы будут использованы при дальнейших разработках гражданского, служебного и боевого оружия.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. СТБ 2505-2017. Оружие гражданское и служебное ручное стрелковое, патроны к нему, оружие холодное клинковое, изделия, конструктивно сходные с ручным стрелковым оружием. Криминалистические требования и методы испытаний. - Минск: Госстандарт 2017. - 6с.

2. СТБ ГОСТ Р 50529-2008. Оружие ручное огнестрельное, устройства промышленного и специального назначения. Требования безопасности и методы испытаний на безопасность. - Минск: Госстандарт 2008. - 87с.

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К ПОКАЗАТЕЛЯМ КАЧЕСТВА  
ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ШЕСТЕРЁН НА ОПЕРАЦИЯХ ИХ  
ОБРАБОТКИ С УЧЁТОМ ПООПЕРАЦИОННЫХ ВЗАИМОСВЯЗЕЙ  
МЕЖДУ ЭТИМИ ПОКАЗАТЕЛЯМИ**

***М.М. КАНЕ, В.К. ШЕЛЕГ, М.А. КРАВЧУК, П.И. КОТ***  
***Белорусский национальный технический университет,***  
***Минск, Беларусь***

*В докладе показана актуальность проблемы определения требований к параметрам качества шестерён и других деталей машин на промежуточных операциях их обработки, описаны основные принципы и зависимости, положенные авторами в методику решения указанной задачи.*

В работах Дальского А.М., Ящерицына П.И., Рыжова Э.В., Аверченкова В.И., Маталина А.А. и др. показано, что при изготовлении деталей машин имеет место технологическая наследственность и качество машин формируется на всех операциях их обработки. Это указывает на важность задачи выбора требований к качеству деталей на всех операциях их обработки с учётом требований к готовой продукции и характера пооперационного изменения показателей качества.

В настоящее время отсутствует общепринятая методика определения требований к параметрам качества деталей машин на различных операциях их изготовления. Имеется обширная информация, зачастую противоречивая, о технологических возможностях различных методов обработки. Например, разброс допустимых значений параметров точности колес до шевингования и достижимой точности после шевингования составляет 200–600%. Достижимая точность после зубофрезерования по различным справочным данным находится в пределах 4-8 степеней точности по ГОСТ 1643-81. В действующих технологических процессах практически не учитываются изменения характеристик качества поверхности зубьев на отделочных операциях после химико-термической обработки зубчатых колес. В тоже время в работах М.М. Кане и А.И. Медведева [1] показано, что на основных операциях обработки, упрочнения и отделки цилиндрических шестерён имеют место закономерные пооперационные взаимосвязи между параметрами качества, которые можно описать полиномом первой степени:

$$\bar{y} = f(\bar{x}) = a + b\bar{x}, \quad (1)$$

где  $\bar{y}$ ,  $\bar{x}$  – средние значения параметра качества после и до рассматриваемой операции;  $a$ ,  $b$  – коэффициенты уравнения.

Однако, как показано в работе [2], доверительные интервалы для теоретического условного среднего  $\bar{y}_x$  существенно зависят от того, в какой точке  $x$  мы их строим, а именно: чем дальше интересующая нас точка  $x$  удаляется от своего среднего  $\bar{x}$ , тем менее надежными оказываются предсказания, основанные на эмпирической регрессионной прямой  $\hat{y}(x)$ , т.е. тем шире становятся соответствующие доверительные интервалы для  $y(x)$ .

С учетом этой особенности линейной регрессионной модели расчет предельно допустимых исходных значений параметра качества для данной операции может быть выполнен по предложенной нами методики, принципиальная схема которой показана на рис.1. Исходными данными для расчета являются:

1. Экспериментально установленная зависимость (1) между значениями рассматриваемого параметра качества до и после данной операции.
2. Крайние значения  $x_1$  и  $x_2$ , которые может принимать рассматриваемый параметр качества на предшествующей операции.
3. Номинальное значение доверительной вероятности  $P$  ( $P=0,95$ ;  $0,99$ ;  $0,9973$  и др.), для которого в дальнейшем рассчитываются доверительные кривые 3 (см.рис.1) и 4 для эмпирической линии регрессии 1 и усредненной прямой 2.
4. Допустимые значения рассматриваемого параметра качества после данной операции. Для показателей точности и качества поверхностей зубьев шестерён, которые в большинстве своем являются существенно положительными величинами, принимается максимально допустимое значение  $u_{\text{доп}}$  показателя (см.рис.1).

Расчёт уравнений кривых  $y^{\max}(x)$  и  $y^{\min}(x)$  (кривые 3и 4 на рис 1), ограничивающих доверительный интервал для эмпирической линии регрессии  $y = f(x)$  (прямая 2 на рис. 1), проводится в следующей последовательности:

- 1.Подсчитываем величины  $C, D$  и  $\lambda$ , с помощью которых затем рассчитываем уравнения для  $y^{\max}(x)$  и  $y^{\min}(x)$ :

$$C = \frac{x_1 - \bar{x}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}}, \quad (2)$$

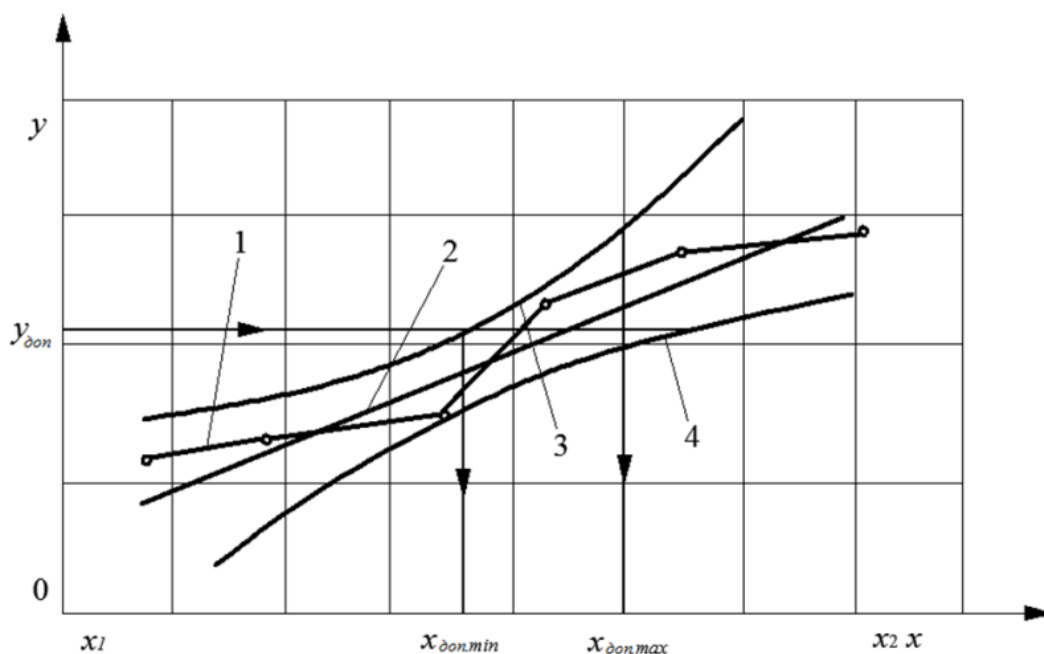


Рисунок 1. – Принципиальная схема определения допустимых значений параметра качества детали на предшествующей операции ее обработки

$$D = \frac{x_2 - \bar{x}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}}, \quad (3)$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{1}{2} \left[ 1 - \frac{1 + nCD}{\sqrt{(1 + nC^2)(1 + nD^2)}} \right]}, \quad (4)$$

где  $x_i$  – значения рассматриваемого параметра качества до данной операции в партии деталей, для которой было рассчитано уравнение регрессии (4.1);  $n$  – объём этой партии деталей.

2. По значениям  $P$ ,  $v-2$  и  $\lambda$  из табл. 26 работы [2] находим  $U_v(P, \lambda)$

3. Записываем уравнения кривых  $y^{\max}(x)$  и  $y^{\min}(x)$ , ограничивающих доверительную зону для экспериментальной линии регрессии  $\hat{y}(x)$ :

$$y^{\min}(x) = \hat{y}(x) - U_v(P, \lambda) \frac{S}{\sqrt{n}} C_1(x), \quad (5)$$

$$y^{\max}(x) = \hat{y}(x) + U_v(P, \lambda) \frac{S}{\sqrt{n}} C_1(x), \quad (6)$$

где  $S$  и  $C_1(x)$  – подсчитываем соответственно по формулам (7) и (8):

$$S = \frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n [y_i - \hat{y}(x_i)]^2 = \frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n (y_i - a - bx_i)^2 \quad (7)$$

$$C_1^2(x) = 1 + \frac{(x - \bar{x})^2}{S_x^2}, \quad (8.)$$

где  $y_i$  – значения рассматриваемого параметра качества после данной операции в партии деталей, для которой было рассчитано уравнение регрессии (1);  $a, b$  – коэффициенты уравнения регрессии (1);  $\hat{y}(x)$  – значение  $y_i$ , рассчитанное по уравнению (1) для значения  $x_i$ ;  $S_x^2$  – дисперсия значений  $x_i$  в данной партии деталей.

Допустимые значения данного параметра качества на предшествующей операции  $x_{\text{доп}}^{\min}$  –  $x_{\text{доп}}^{\max}$  рассчитываем при подстановке в уравнения (5) и (6) вместо  $y^{\min}(x)$  и  $y^{\max}(x)$  допустимые значения данного параметра качества после рассматриваемой операции.

Начиная расчет допустимых исходных погрешностей для определенного показателя качества с последней операции обработки зубчатого венца и выполняя его последовательно для всех предшествующих операций, мы получим рациональные значения показателей качества колес на всех операциях их обработки, в том числе для операции зубофрезерования.

### Выводы

1. Показаны актуальность проблемы выбора требований к качеству деталей машин вообще и цилиндрических шестерён в частности на промежуточных операциях их обработки и несовершенство имеющихся методов решения этой задачи.

2. Описана предложенная авторами методика решения этой задачи, позволяющая учесть условия обработки шестерён и обеспечить необходимое качество готовой продукции.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Кане М.М. Изменение параметров качества поверхности зубьев цилиндрических зубчатых колес на различных операциях их изготовления / М.М. Кане, А.И. Медведев // Вестник машиностроения. – 1997.-№7
2. Айвазян С.А. Статистическое исследование зависимостей. / С.А. Айвазян, М.: Металлургия, 1968

## САПР УНИВЕРСАЛЬНО-СБОРНЫХ СТАНОЧНЫХ ПРИСПОСОБЛЕНИЙ ДЛЯ КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЕЙ

**Н.В. БЕЛЯКОВ, Ю.Е. МАХАРИНСКИЙ**

*Витебский государственный технологический университет, Беларусь*

**Н.Н. ПОПОК**

*Полоцкий государственный университет, Беларусь*

*Приводятся основы создания и функционирования системы автоматизированного синтеза компоновок универсально-сборных приспособлений для корпусных деталей средних габаритных размеров. Система позволяет: формировать схемы установки заготовок, обеспечивающие на стадии проектирования требуемые допуски взаимного расположения конструктивных элементов; производить автоматизированное проектирование трёхмерных моделей компоновок универсально-сборных приспособлений, их чертежей, а также технологических схем сборки и разборки.*

Анализ работы станкостроительных предприятий показывает, что в общей номенклатуре обрабатываемых деталей корпусные детали составляют порядка 15-20%. Причем порядка 60% из них являются деталями средних габаритных размеров. Обеспечение точности взаимного расположения конструктивных элементов (функциональных модулей) деталей должно осуществляться уже на стадии проектирования технологии за счет правильного выбора баз, состава установочных и установочно-зажимных элементов приспособлений и их компоновки. В практической работе в большинстве случаев для каждой новой корпусной детали синтезируется индивидуальный технологический процесс [1-2], а для операций серийного, крупносерийного и массового производства проектируются соответствующие станочные приспособления. При этом порядка 80% приспособлений на операциях обработки корпусных деталей на фрезерных обрабатывающих центрах являются универсально-сборными (УСП).

В настоящее время на предприятиях компоновка и сборка УСП осуществляется слесарями-сборщиками высокой квалификации по чертежу детали. Как такового проектирования компоновочной схемы приспособления никем не производится. Сборка приспособления осуществляется исходя из собственного опыта и интуиции сборщика. При этом вопросы обеспечения точности взаимного расположения конструктивных элементов обрабатываемой заготовки не рассматриваются вовсе, что часто приводит к неустранимому браку.

Повысить качество проектирования приспособлений и сократить трудоемкость проектных работ в десятки раз позволяет их автоматизация. Некоторые компании представляют базы данных 3-D элементов УСП стоимостью порядка нескольких тысяч у.е., однако каких-либо инструментов автоматического формирования компоновок приспособлений с учетом обеспечения требуемых допусков взаимного расположения конструктивных элементов деталей они не предоставляют.

Одной из причин отсутствия работоспособных систем автоматизированного проектирования компоновок УСП для корпусных деталей является несовершенство положений теории базирования и, как следствие, отсутствие методик формирования заданий на проектирование приспособлений обеспечивающих требуемые допуски взаимного расположения функциональных модулей. Ранее авторами настоящей работы предложен ряд методик, моделей и алгоритмов, позволяющих использовать теорию базирования в качестве инструмента синтеза маршрута обработки заготовок корпусных деталей, позволяющего определять порядок обработки заготовки, выбирать базы на первой и последующих операциях, определять число связей накладываемых базами и генерировать задание на проектирование станочных приспособлений [1-3].

Предложенные методики, модели и алгоритмы позволили создать систему автоматизированного синтеза компоновок универсально-сборных приспособлений для корпусных деталей средних габаритных размеров при обработке на фрезерных обрабатываемых центрах. Система разработана как приложение графического твердотельного редактора Autodesk Inventor. Пользователь системы средствами графического редактора проектирует трехмерную твердотельную модель детали с кодированием функциональных модулей, допусков взаимного расположения и линейных размеров. В приложении задаются технологические возможности оборудования, векторы доступности для обработки и др. Пользователь может сам указать конструктивные элементы, подлежащие обработке на операции. Далее система предлагает несколько вариантов маршрута обработки заготовки с указанием приоритетных базовых поверхностей для обеспечения допусков взаимного расположения функциональных модулей, состав установочных, установочно-зажимных и (или) зажимных элементов, рекомендует состав базовых, направляющих и прочих элементов УСП, формирует несколько вариантов трёхмерных компоновок приспособления, монтажные чертежи, а также наглядные схемы сборки-разборки сложных компоновок.

Система проходит апробацию на ОАО «Вистан» (г. Витебск) и в учебном процессе УО «ВГТУ» (рисунок). Разработанная система позволяет: снижать вероятность неустранимого брака за счет научно обоснованного реше-

ния вопроса обеспечения допусков взаимного расположения конструктивных элементов детали на этапе проектирования компоновки; снижать временные затраты на подготовку производства; собирать приспособления сборщиком невысокой квалификации; составлять наиболее рациональную номенклатуру пусковых комплектов; включить службу УСП в единую автоматизированную систему технологической подготовки производства.

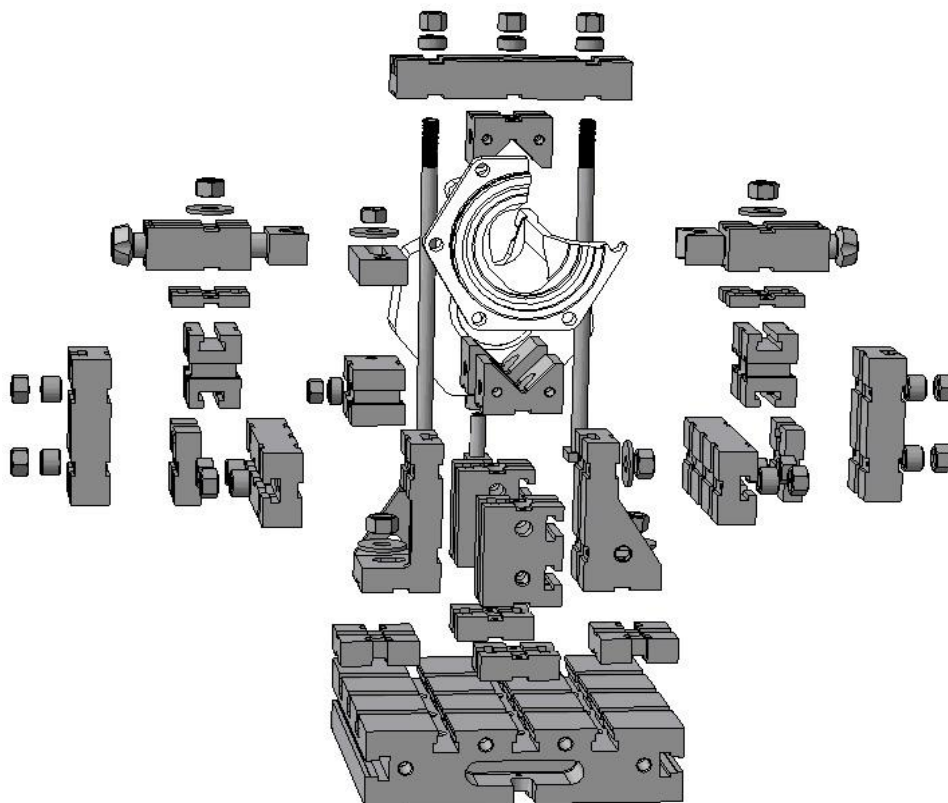


Рисунок. – Ассоциативная схема сборки УСП, выполненная с помощью системы (деталь «Рукав 422-240711», ОАО «Вистан»)

## ЛИТЕРАТУРА

1. Попок, Н. Н. Методы и модели компьютерного проектирования технологических процессов изготовления корпусных деталей / Н. Н. Попок, Н. В. Беяков // Вестник ПГУ. – 2010. – №3, Серия В. Промышленность. Прикладные науки. – С. 68-75.
2. Попок, Н. Н. Система автоматизированного проектирования технологических процессов изготовления корпусных деталей на станкостроительных предприятиях Витебской области / Н. Н. Попок, Н. В. Беяков, В. И. Ольшанский, Ю. Е. Махаринский, М. М. Жадович, Д. Б. Ермашкевич, А. В. Белецкий, В. В. Величко // Вестник ПГУ. – 2011. – №11, Серия В. Промышленность. Прикладные науки. – С. 2-11.
3. Махаринский, Е. И. Теория базирования в проблеме проектирования технологических процессов механической обработки и станочных приспособлений / Е. И. Махаринский, Н. В. Беяков, Ю. Е. Махаринский // Вестник машиностроения. – 2008. – №9. – С. 34-45.



## **ИЗГОТОВЛЕНИЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПОЛИМЕРНОГО ИЗДЕЛИЯ С ПОСЛЕДУЮЩЕЙ МЕТАЛЛИЗАЦИЕЙ МЕДЬЮ**

**Н.А. КАНАНОВИЧ, И.Л. ПОБОЛЬ, А.А. ПРЕДКО**

**Физико-технический институт НАН Беларуси, Минск, Беларусь**

*Изучен комбинированный метод изготовления изделий, сочетающий 3D печать заготовки из полимера с последующим осаждением на нее слоя меди для возможного применения в качестве электродов-инструментов для электроэрозионных прошивочных станков.*

Активно проводятся исследования и разработки по получению деталей методами 3D печати. Наиболее разработана область изготовления изделий из различных полимеров. Значительно более сложными и дорогостоящими являются устройства и технологии печати изделий из металлов.

В работе опробован вариант получения на 3D принтере полимерной заготовки требуемой формы, которая, после нанесения на нее металлического покрытия, приобретет определенную совокупность свойств, присущую изготовленному из массивной заготовки (в том числе из металла). Предполагается, что такая полимерно-металлическая композиция может обладать рядом преимуществ по сравнению с металлическим изделием, полученным традиционными вычитающими методами обработки. Среди них низкая себестоимость, короткий срок изготовления, малая масса, быстрое восстановление покрытия в случае разрушения и др.

Одной из возможных областей использования таких полимерно-металлических композиций является получение электродов-инструментов для электроэрозионных прошивочных станков. Такое оборудование широко применяется для изготовления оснастки (штампов, пресс-форм и т.п.) из твердых сплавов системы WC-Co и других, из инструментальных сталей высокой твердости, деталей авиационной техники (лопаток турбин и др.) из труднообрабатываемых сплавов, в том числе обладающих высокой вязкостью, плохой обрабатываемостью при лезвийной обработке.

Удаление слоев материала с поверхности заготовки происходит последовательно благодаря воздействию электрических импульсов. Прошивочные электроды в процессе эрозионного взаимодействия с обрабатываемым сплавом подвергаются комплексу разнообразных физико-химических,

газо- и гидродинамических, термомеханических воздействий. Это предъявляет специфические требования к материалу электрода. Электроды изготавливаются из электролитической меди и медных сплавов, композиций меди с вольфрамом, серого чугуна, первичного алюминия и алюминиевых сплавов, графита и графито-полимерных композиций. Учитывая многие технологические параметры, предпочтительным материалом для этих целей является чистая медь.

**Оборудование, материалы и методики исследований.** Для создания полимерной заготовки использовали технологию FDM получения трехмерных моделей, основанную на послойном термическом укладывании полимерной нити. С помощью программы SolidWorks была создана 3D-модель с нужной конфигурацией. Далее модель выращивали на 3D-принтере CreatBot D600 из PLA полимера.

При послойном выращивании материала из проволоки диаметром 1,75 мм неизбежным следствием является небольшая волнистость на боковой поверхности изделия. Чтобы избавиться от нее, поверхность полимерного изделия обрабатывали в растворе хлористого метилена. Далее для повышения адгезии осаждаемой меди к полимерному изделию создавали искусственную шероховатость поверхности с помощью наждачной бумаги P1000. Поверхности обезжиривались 30% раствором NaOH в течение 10 минут, промывались в дистиллированной воде и высушивались.

Перед металлизацией поверхности образцов из пластика на них создавали токопроводящий слой из углерода с помощью аэрозольного баллона. Магнетронным методом на образцы наносили слои меди толщиной 5 мкм, которые имел высокую адгезию к основе.

Последующая задача получения на полимерной основе слоя меди толщиной в несколько сотен микрометров решалась методом гальванического выращивания с использованием потенциостата-гальваностата AUTOLAB и электролита из  $H_2SO_4$  и  $CuSO_4$  с добавлением выравнивающих добавок. Противоелектрод выполнен из пластины из сплава М1, приблизительно эквидистантно повторяющей форму полимерной основы. Это позволило распределить ток по поверхности заготовки и создавать равномерно нанесенный слой меди. Для формирования слоя меди толщиной до 1000 мкм было необходимо решить задачу выбора такого режима гальванизации, при котором материал выращенного покрытия был достаточно мягким и не имел высоких внутренних напряжений. Для этого был подобран оптимальный режим и создана новая программа для потенциостата-гальваностата AUTOLAB.

Морфологию поверхности образца с слоем меди изучали на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) MIRA 3 LM. Неразрушающий контроль структуры осажденного медного слоя проводили на рентгенотелевизионной установке XICube Seifert.

**Результаты.** С использованием перечисленных технологических операций методом 3D печати выращен образец диаметром 10 мм и длиной 90 мм (на рисунке 1 показан внешний вид и рентгенодефектоскопическое изображение). На нем сформировано медное покрытие толщиной порядка 410 мкм. Методом гальванопластики осаждается чистая медь, т.к. в ходе процесса происходит электролитическое рафинирование и все примеси, находящиеся в противоеlectроде, не соосажаются.



Рисунок 1. – Образец, выращенный из полимера, со слоем меди

Анализ на СЭМ MIRA 3 LM слоя меди на образце (рисунок 2) показал, что топография поверхности в значительной степени зависит от режима осаждения (плотности тока и температуры), концентрации используемых веществ электролита и примесей. Морфология данной поверхности развита ввиду попадания в электролит с поверхности образца частиц углерода. Углерод соосаждался с медью, образуя на поверхности покрытия новые, энергетически более выгодные, центры кристаллизации, включения размером от 10 до 30 мкм. Наблюдаются микротрещины, образованные ввиду использования электролита на основе простых солей с низким пере-напряжением процесса осаждения. С ростом толщины слоя меди возрастают внутренние напряжения в материале, которые и приводят к образованию микротрещин.

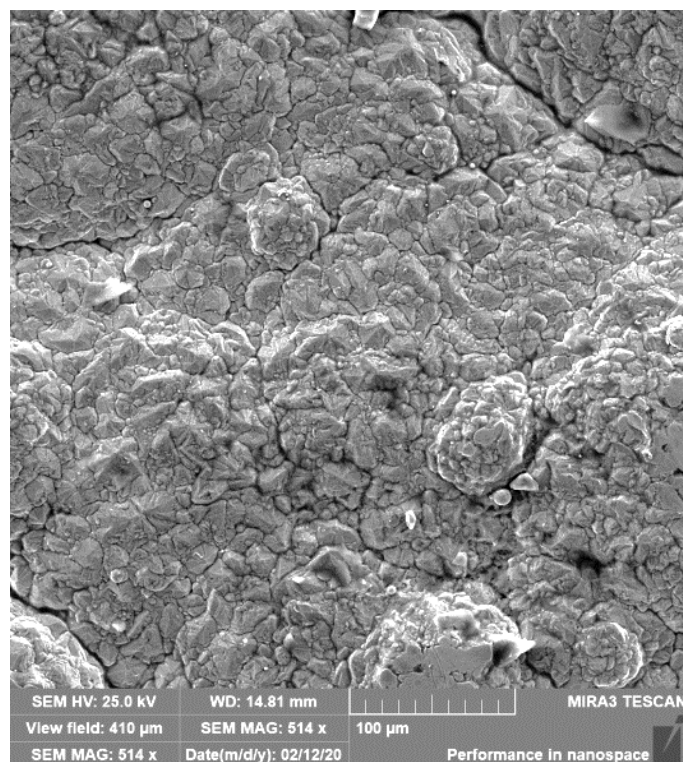


Рисунок 2. – Изображение поверхности меди

Структура выращенного слоя меди однородная и плотная (рисунок 3). Справочное значение микротвердости меди марки М1 - HV 100. В выращенном слое меди её микротвердость от значений HV 100-105 вблизи полимерной подложки (места начала роста покрытия) несколько снижается (до HV 90) к поверхности слое из-за увеличения фактической площади образца и уменьшения плотности тока процесса, что приводит к осаждению менее плотного покрытия.

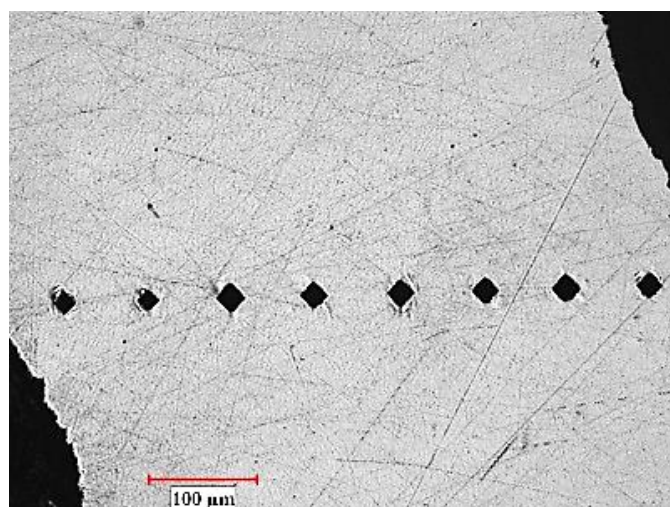


Рисунок 3. – Поперечное сечение слоя меди, выращенного на заготовке из PLA полимера

УДК 621.91.02

## ПОДГОТОВКА МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА НА ОСНОВЕ 3D-ПРОТОТИПИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОСНАСТКИ

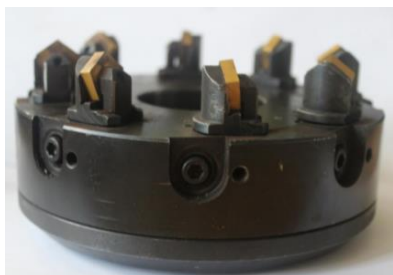
**Н.Н. ПОПОК, С.А. ПОРТЯНКО**

*Полоцкий государственный университет, Беларусь*

*Методика 3D проектирования и печати технологической оснастки с использованием современных программных продуктов «Ansys», «Компас-Вертикаль», «Solid Works» в значительной степени сокращает трудо- и время затраты на этапах подготовки машиностроительного производства, что несомненно сказывается на производительности и себестоимости конечного продукта.*

Для современного многономенклатурного производства требуется применение быстроперестраиваемой технологической оснастки, в частности режущих инструментов. Для сокращения времени и финансовых затрат на этапе конструкторской и технологической подготовки производства предлагается использовать 3D макетирование технологической оснастки.

Разработана методика 3D проектирования и печати на 3D принтерах макетов технологической оснастки, в частности блочно-модульных режущих инструментов (БМРИ) [1]. Методика включает расчет и проектирование 3D конструкций с использованием программных продуктов «Ansys», «Компас-Вертикаль», «Solid Works» и технологий их изготовления механической обработкой на токарных и фрезерных трехосевых станках модели «Emko» и «Robodrill», печатью на 3D принтерах «Mojo», Mass Portal Pharaoh XD 30 и «гибридным» методом, совмещающим традиционные и аддитивные технологии (рисунок 1).



а



б



в

Рисунок 1 – Внешний вид блочно-модульного режущего инструмента, полученного из:  
а – металла; б – пластика ABSplus-P430; в – металла и пластика ABSplus-P430

Отличительными особенностями полученных макетов БМРИ являются «обтекаемость» форм корпусов и рациональные с точки зрения законов гидро- и аэродинамики формы конструктивных элементов для стружко- и теплоотвода, а также использование специальных балансировочных устройств.

Проведено математическое и физическое моделирование различных вариантов форм (цилиндрических, сферических, торовых) и расположения конструктивных элементов (ортогональных и под углом) при обтекании жидкостями и воздушными потоками БМРИ.

Установлены оптимальные варианты конструкций, обеспечивающие минимальные энергозатраты, и совпадение стружко- и теплопроводящих потоков из рабочей зоны при статическом и динамическом нагружении БМРИ.

Произведена оценка параметров конструктивных элементов и поверхностей БМРИ с использованием видеоизмерительного микроскопа модели NVM-4030D фирмы NORGAU и профилографа-профилометра «Абрис-ПМ7». Установлено, что шероховатость поверхности макетов БМРИ в начальный момент печати составляет для 50% и 100% заполнения материалом –  $R_a = 6,685$  мкм и  $2,058$  мкм, для конической поверхности –  $R_a = 5,813$  мкм и  $2,058$  мкм, для боковой поверхности –  $R_a = 6,165$  мкм и  $6,282$  мкм.

Выполнены нормирование работ и оценка затрат при реализации различных технологий производств БМРИ, данные по которым представлены в таблице.

Таблица. – Оценка затрат на изготовление

Метод изготовления:		
Традиционный	Аддитивный	Гибридный
$\approx 1000$ бел. рублей	$\approx 350$ бел. рублей	$\approx 720$ бел. рублей

Как видно из таблицы, даже применение «гибридного» метода производства из полимерных материалов макета БМРИ позволяет сэкономить средства по сравнению с отработкой подобных конструкций на экспериментальных образцах из металла.

## ЛИТЕРАТУРА

1. 3D-макетирование сборных режущих инструментов для высокоскоростной обработки / Н.Н. Попок, С.А. Портянко. Материалы 34-ой Международной научно-технической конференции «Перспективные направления развития технологии машиностроения и металлообработки» - Минск: БНТУ, 2019 г. – с. 97-98.



## СТЕПЕНЬ СЛОЖНОСТИ КАК УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ПОКАЗАТЕЛЬ ОЦЕНКИ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

**Н.Н. ПОПОК, Е.В. БРИТИК**

*Полоцкий государственный университет, Беларусь*

*Рассматриваются примеры применения показателя степени сложности в различных отраслях промышленности. Приведен анализ существующих подходов и методик по оценке степени сложности и предлагаются классификационные, нормативные и расчетные основы проектирования технологического оснащения с учетом степени сложности.*

Анализ литературных источников показывает, что понятие «сложность» давно обсуждается в научных кругах как с позиции философии, так и с позиций реальных секторов экономики. Обусловлено это сложностью проектирования и постоянного усложнения техники, что вызывает затруднения при определении сложности процессов и изделий и её качественной и количественной оценки.

В связи с конверсией производства предлагаются методы и алгоритмы оценки технологических возможностей (технического базиса) предприятия путём сравнения базовых и новых (принимаемых к производству) изделий, оценки сложности спроектированных изделий с применением методов математической статистики.

В реалиях современной промышленности проблема конверсии не столь актуальна, но возникает новая задача, которая заключается в быстрой реакции производства на стремительно изменяющийся рынок, в частности, решение проблемы диверсификации. Сроки актуальности изделий уменьшаются, возникают новые потребности, которые влекут за собой производство новой и более современной продукции. Экспертная система оценки степени сложности должна решить данную проблему, позволив оценить возможности текущего производства и показать степень ее модернизированности.

Концепция мобильного предприятия [1] на определенных этапах реорганизации и развития предлагает оценку степени сложности изделий по конструктивным, технологическим и функциональным показателям (рисунок 1).

Степень сложности рассчитывается по следующей формуле:

$$Q_c = Q_K^{X_K} \cdot Q_T^{Y_T} \cdot Q_\Phi^{Z_\Phi},$$

где:  $Q_K$ ,  $Q_T$ ,  $Q_\Phi$  – степень сложности соответственно конструктивная, технологическая и функциональная;

$X_k$ ,  $Y_m$ ,  $Z_\phi$  – показатели влияния соответственно конструктивной, технологической и функциональной сложности на общий показатель сложности.

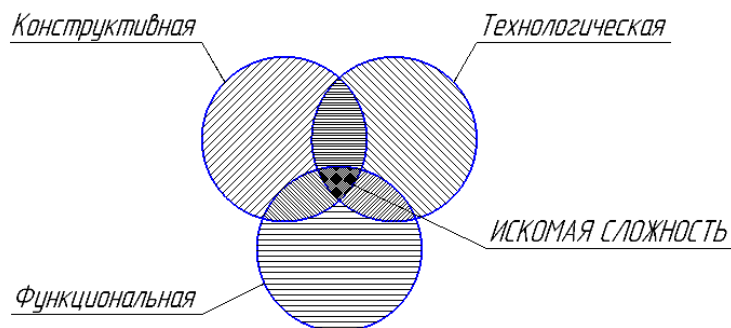


Рисунок 1. – Степень сложности

Каждый из показателей определяется через трудоемкость и поправочные коэффициенты:

$$Q_k = T_k \cdot K_k, Q_m = T_m \cdot K_m, Q_\phi = T_\phi \cdot K_\phi,$$

где:  $T_k$ ,  $T_m$ ,  $T_\phi$  – трудоемкость соответственно проектирования, изготовления и эксплуатации изделия;

$K_k$ ,  $K_m$ ,  $K_\phi$  – поправочные коэффициенты, учитывающие отличие данных условий от тех, при которых оценивалась трудоемкость (нормативная).

При оценке степени сложности изделий возникает необходимость классификации их поверхностей и конструктивных элементов.

Исходя из анализа вышеперечисленных материалов предложена методика расчета степени сложности изделий машиностроения [1]. Реализация методики связана с введением ряда понятий и определений.

Новое изделие – изделие, впервые принимаемое предприятием к производству.

Базовое изделие – изделие, ранее выпускавшееся предприятием серийно или массово.

Простейшее изделие – изделие с минимальным количеством структурных составляющих, определяющих его вид. Например, признаки (ключевые слова), характерные для простейшего станка, включают следующие: станина, шпиндельная бабка, шпиндель, платформа для установки инструмента или заготовки.

Условная деталь - деталь, имеющая массовое использование в машиностроительных изделиях. В качестве условной детали целесообразно использовать вал среднестатистической степени сложности, поскольку именно валы имеют наибольший процент применения в современных ма-



шинах и токарных станках составляют большую часть производственного парка металлорежущих станков.

Приведенная деталь – деталь, структурная сложность которой выражается числом содержащихся в ней условных деталей.

Структурная сложность – отношение числа деталей изделия к числу деталей простейшего изделия.

В отличие от известных подходов, предлагаемая методика оценки сложности, предусматривает обязательное ограничение объектов и процессов производства по частоте встречи или применяемости и моделирование ситуации с наиболее часто встречающимися или имеющими наибольшее применение в производстве. Это существенно сокращает время на проведение экспертизы.

Анализ по выпуску изделий на предприятиях позволяет выделить следующие возможные ситуации:

1. Предприятие выпускает базовое изделие, близкое по номенклатуре новому.
2. Предприятие не выпускает изделие, близкое по номенклатуре новому.
3. Предприятие планирует выпускать новое изделие с созданием соответствующего технологического базиса.

Исследуя применяемость машиностроительного оборудования и инструмента целесообразно сделать наибольший акцент на следующем оборудовании:

- многоцелевые обрабатывающие центры;
- токарные станки;
- шлифовальные станки.

Для инструмента наибольшая применяемость характера для следующих их типов:

- фрезерный;
- сверлильный;
- резцовый.

В Полоцком государственном университете в настоящий момент ведется разработка автоматизированной экспертной системы для анализа машиностроительного оборудования по показателю степени сложности, который должен быть основан на нормативных документах и действующих стандартах, и связан с экономическими показателями, а также учитывать современные тенденции развития техники и помогать оценить эффективность оборудования и инструмента на современном рынке.

Для апробации методики были проведены исследования шпинделей шлифовальной группы станков. Результаты расчетов занесены в таблицы 1 – 3.

Таблица 1 – Сводная таблица исходных параметров для определения степени сложности

	№ ин- диви- дуаль- ная группа	Критерии	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
			Квалитет	5	7	7	5	7	7	7	5	7	7	5	9		
1		Шероховатость	5	0,32	1,25	1,25	0,16	1,25	1,25	1,25	0,16	1,25	1,25	0,32	5		
		Переходы	3	6	5	5	7	5	5	5	7	5	5	6	3		
		Квалитет	9	5	7	7	5	7	7	7	5	7	5	8	9		
2		Шероховатость	5	0,32	1,25	1,25	0,16	1,25	1,25	1,25	0,16	1,25	0,32	2,5	5		
		Переходы	3	6	5	5	7	5	5	5	7	5	6	4	3		
		Квалитет	8	5	5	5	5	7	7	7	5	5	5	6	8		
3		Шероховатость	2,5	0,32	0,32	0,32	0,08	1,25	1,25	1,25	0,08	0,32	0,32	0,63	2,5		
		Переходы	4	6	6	6	7	5	5	5	7	6	6	5	4		
		Квалитет	9	5	8	8	5	9	8	9	5	8	8	5	9		
4		Шероховатость	5	0,32	2,5	2,5	0,16	5	2,5	5	0,16	2,5	2,5	0,32	5		
		Переходы	3	6	4	4	7	4	4	4	7	4	4	6	3		
		Квалитет	9	7	5	9	8	4	9	9	9	4	8	9	5	7	9
5		Шероховатость	5	1,25	0,32	5	2,5	0,04	5	5	5	0,04	2,5	5	0,32	1,25	5
		Переходы	3	5	6	4	4	8	4	4	4	8	4	4	6	5	3
		Квалитет	9	5	7	7	5	7	7	7	5	7	7	5	9		
6		Шероховатость	5	0,32	1,25	1,25	0,16	1,25	1,25	1,25	0,16	1,25	1,25	0,32	5		
		Переходы	3	6	5	5	7	5	5	5	7	5	5	6	3		

Таблица 2 – Итоговая таблица технологической трудоемкости изготовления условной детали

Группы	№ детали	Количество переходов
Шлифовальная	1	67
	2	66
	3	72
	4	60
	5	72
	6	67

Таблица 3 – Величины эквивалентов приведенных деталей внутри шпинделей при одной группе станков и различных типах

Группы	№ детали	Количество переходов	Эквивалент приведенных деталей внутри группы станков	T, шт/мин
Шлифовальная	1	67	0,93	956,508
	2	66	0,92	531,15
	3	72	1,00	3604,2
	4	60	0,83	1151,28
	5	72	1,00	3444,72
	6	67	0,93	1256,64

Сопоставляя полученные данные и сведения о трудоемкости [2] изготовления каждого из шпинделей можно сделать вывод о практически линейной зависимости степени сложности и трудоемкости изготовления деталей.

Проведенный анализ исследований степени сложности изделий машиностроения показал достоинства и недостатки методик оценки степени сложности, а также то, что применяемые теоретические подходы и методики разнообразны и трудоемки в практическом применении. Отмечен факт отсутствия единой методики оценки степени сложности, что приводит к различного вида неточностям и погрешностям при попытке интерпретировать результаты исследований и расчетов. Предложено оценивать затраты на разработку модульных конструкций технологического оснащения производства с учетом их степени сложности.

Предложен обобщающий показатель степени сложности, который базируется на действующих стандартах и нормативных документах и позволяет проанализировать изделия и технологии с точки зрения рациональности их проектирования, изготовления и применения. Разработана математическая модель сложности объектов и процессов, которая вклю-

чает конструктивные, технологические и функциональные характеристики, и основываются на ограничительных перечнях типоразмеров, параметров изделий и техпроцессов с учетом их наибольшей применяемости в производстве.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Мобильная реорганизация машиностроительного производства/НН Попок - Мн.: УП «Технопринт, 2001, 396с.
2. Степень сложности станков шлифовальной группы /Попок Н. Н., Сидикевич А. В., Бритик Е. В., Материалы V Международной научно-практической конференции «ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ: ИННОВАЦИИ И КАЧЕСТВО», Барановичи, БарГУ, 2018 г., с.119-121

## ПОСЛОЙНЫЙ ХИМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ АЛЮМООКСИДНОГО ПОКРЫТИЯ НА СИЛУМИНЕ

*Н.А. КАНАНОВИЧ, А.А. ПРЕДКО*

*Физико-технический институт НАН Беларуси, Минск, Беларусь*

*Приведены результаты анализа поверхностного слоя, в том числе распределения химических элементов по глубине на силумине, подвергнутом высоковольтному электрохимическому оксидированию.*

Структура и состав материала на поверхности изделия определяет прочность, износо- и коррозионную стойкость, адгезию и другие свойства детали. В ФТИ НАН Беларуси разработан и применяется в промышленных масштабах широкий спектр методов инженерии поверхности, включающих нанесение металлических и композиционных покрытий на стали и твердые сплавы толщиной в диапазоне от сотен нанометров до десятков микрометров, ионную химико-термическую обработку сталей и титановых сплавов с получением упрочненного слоя глубиной от десятков микрометров до нескольких миллиметров, технологии наплавки покрытий с толщинами до нескольких миллиметров. Созданы оборудование и технология высоковольтного электрохимического оксидирования (ВВЭО) сплавов алюминия [1].

Для изучения свойств материалов, подвергнутых различным вариантам инженерии поверхности, а также отработки технологических процессов поверхностного упрочнения, важно быстро и достоверно осуществлять анализ химического состава материала на поверхности и по глубине модифицированного слоя. Сегодня в мире имеется достаточно большой перечень методов анализа структуры и состава поверхностных слоев. Для исследования материалов удобным инструментом показал себя оптически-эмиссионный спектрометр плазмы тлеющего разряда GD Profiler 2 (HORIBA Jobin Yvon, Япония-Франция), один из самых современных приборов оперативного изучения химического состава сплавов.

Цель работы – анализ поверхностного слоя, в том числе определение профиля химических элементов по глубине на сплаве после ВВЭО.

**Метод исследования и материал.** Суть метода ВВЭО заключается в выращивании на поверхности сплавов алюминия с применением тири-

стороннего источника питания оксидных покрытий толщиной до 100 мкм. В наших исследованиях оксидирование проводилось в водном растворе серной кислоты  $H_2SO_4$ . Покрытия придают поверхности улучшенные физико-механические характеристики, в том числе твердость, износо- и коррозионную стойкость, а также привлекательные декоративные свойства [1,2]. Основными технологическими параметрами процесса ВВЭО являются температура электролита (обычно в диапазоне 5-25 °С) и плотность тока (от 1 до 5 А/дм<sup>2</sup>).

Для анализа оксидного слоя на образцах из силумина (таблица) использовались оптический микроскоп МИ-1 (Планар) и спектрометр GD Profiler 2, в котором сочетаются тлеющий разряд и спектрометр оптической эмиссии. Располагаемый перед анодом образец является катодом. Пространство внутри анода вакуумируется, под воздействием электрического поля ионы аргона распыляют поверхность образца, частицы поступают в плазму, возбуждаются и попадают на детектор.

Таблица. – Химический состав исследованного силумина

Элемент	Al	Si	S	N	H	Cu	Fe	Mn
Мас. %	88,8	4,22	0,08	0,55	0,13	4,18	0,5	0,39

**Результаты.** С помощью оптической микроскопии выявлен оксидный слой на образце толщиной 28 мкм (рисунок 1). В оксидном покрытии формируются перпендикулярные поверхности поры, которые при повышении интенсивности протекания процесса роста слоя (благодаря управляемому росту плотности тока и температуры электролита) и его одновременного травления увеличиваются в диаметре. Размеры пор изменяются от ~20 мкм до ~250 мкм [2]. Максимальная микротвердость материала покрытия достигается при температуре электролита 5 °С, при увеличении температуры электролита микротвердость оксидированного слоя несколько уменьшается.

Анализ образца на спектрометре Profiler-2 позволил определить толщину выращенного слоя (порядка 28 мкм) и профиль концентрации химических элементов (алюминия, кислорода и азота) (рисунок 2). В поверхностном слое (толщиной около 3 мкм) обнаружено присутствие серы и азота. Наличие серы объясняется ее адсорбцией на поверхности оксидного слоя во время процесса его формирования. Алюминий в этом поверхностном слое практически отсутствует, с перемещением зоны анализа до глубины 30 мкм содержание серы, азота и кислорода резко уменьшается, а алюминия возрастает. Высокое содержание кислорода объясняется составом и пористостью алюмооксидного слоя  $Al_2O_3$ .

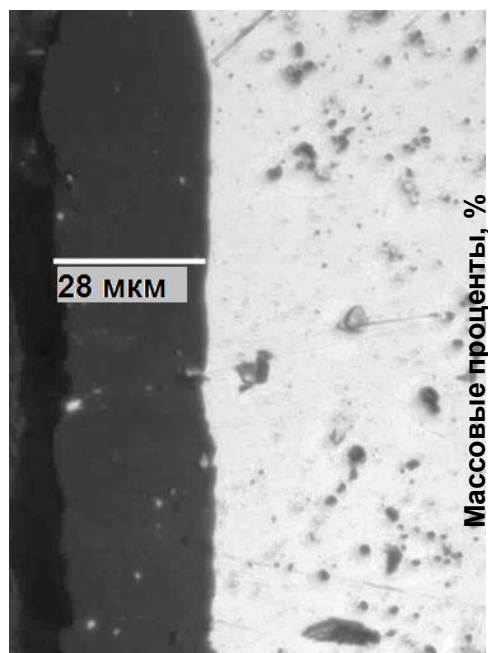


Рисунок 1. – Поперечное сечение образца

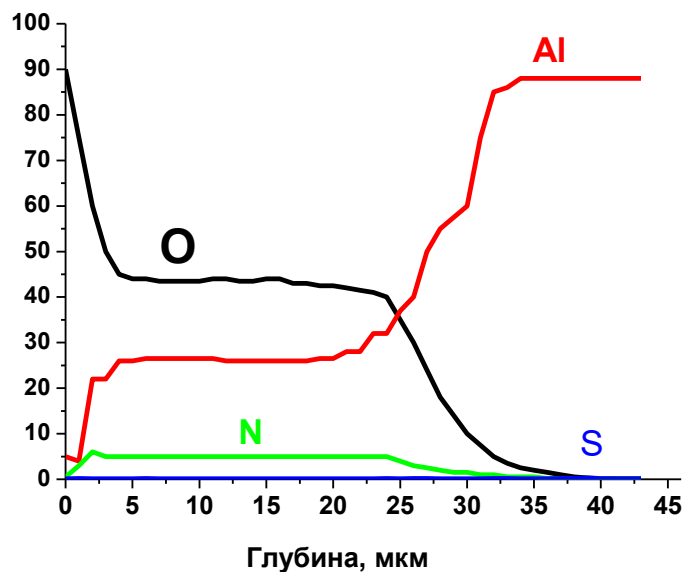


Рисунок 2. – Распределение элементов по глубине оксидированного силумина

**Закключение.** Метод высоковольтного электрохимического оксидирования сплавов алюминия дает возможность получения достаточно больших толщин твердого и плотного оксидного слоя, эффективной защиты от износа и коррозии.

Спектрометры тлеющего разряда – это простой и удобный способ определения распределения химических элементов в приповерхностных слоях различных однородных материалов, а также распределения химических элементов в многослойных образцах различной природы. Спектрометры тлеющего разряда находят все большее применение в задачах анализа покрытий. В научных исследованиях спектрометры тлеющего разряда могут найти применение в лабораториях, которые занимаются вопросами анализа тонких покрытий.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Метод высоковольтного электрохимического оксидирования алюминия / Паршутто А. А [и др.] //Современные методы и технологии создания и обработки материалов. – 2011. – Кн. 2. – Р. 294 – 298.
2. Pobol I. Formation of the porous structure of oxide coatings on aluminum alloys by highvoltage electrochemical oxidation / Nanoscience and Technology: An International Journal. 2019. – V. 10, N 4. - P. 377-383.

## **ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ МАЛОРАЗМЕРНЫХ ОТЛИВОК ИЗ АЛЮМИНИЕВОЙ БРОНЗЫ НА ИХ СТРУКТУРНО-ФАЗОВОЕ СОСТОЯНИЕ И ДЮРОМЕТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА**

**В.А. КУКАРЕКО, А.В. КУШНЕРОВ**

*Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск*

**Е.И. МАРУКОВИЧ**

*Институт технологии металлов НАН Беларуси, Могилев*

*Изучено влияние режимов кристаллизации (непрерывное и центробежное литье) малоразмерных отливок из бронзы БрА10Ж4Н4 на структуру, фазовый состав и твердость. Методами металлографического и рентгеноструктурного анализов установлено, что отливки состоят из  $(\alpha+\gamma')$  эвтектоида,  $\alpha$ -фазы и интерметаллидов  $AlCu$ ,  $Al_2Cu_3$ . Матричная фаза в сплаве, закристаллизованном методом центробежного литья, вследствие ее более высокой легированности атомами  $Al$ , имеет повышенное значение параметра кристаллической решетки, по сравнению со случаем непрерывного литья. Твердость отливки, полученной методом центробежного литья, по сравнению с непрерывным литьем повышается, что обусловлено образованием более дисперсной структуры, а также большим твердорастворным упрочнением матричной фазы отливки.*

**Введение.** Литейное производство – один из основных способов получения металлических изделий и заготовок для различных отраслей промышленности, в частности, для машиностроения и приборостроения. Это обусловлено тем, что литье позволяет получать заготовки и детали из различных сплавов, массой от нескольких граммов до сотен тонн с разнообразной структурой и широким диапазоном эксплуатационных свойств [1]. В настоящее время, известно несколько десятков видов литья, обладающих достаточно широкой универсальностью [2]. Однако данные по влиянию режимов кристаллизации на структурно-фазовое состояние, а также механические свойства малоразмерных отливок из цветных металлов и сплавов изучены недостаточно полно. В связи с этим, целью данной работы является установление влияния режимов кристаллизации малоразмерных отливок из бронзы БрА10Ж4Н4 на их структурно-фазовое состояние и дюрометрические свойства.



**Материалы и методы исследований.** Материалом для исследования выбраны образцы малоразмерных отливок из сплава БрА10Ж4Н4, полученных методом центробежной заливки и методом непрерывного литья. Отливки были получены в институте технологии металлов НАН Беларуси. Металлографические исследования образцов проводились на оптическом микроскопе АЛЬТАМИ МЕТ 1МТ. Травление образцов выполнялось в спиртовом растворе  $\text{FeCl}_3 + \text{HCl}$  [3]. Исследование структурно-фазового состояния образцов проводилось на дифрактометре ДРОН-3.0 в монохроматизированном кобальтовом излучении. Измерение твердости проводилось по методу Виккерса на твердомере DuraScan 20 при нагрузке на индентор 10 кг.

**Результаты исследований и их обсуждение.** Микроструктуры исследуемых образцов отливок из сплава БрА10Ж4Н4 представлены на рисунке 1.

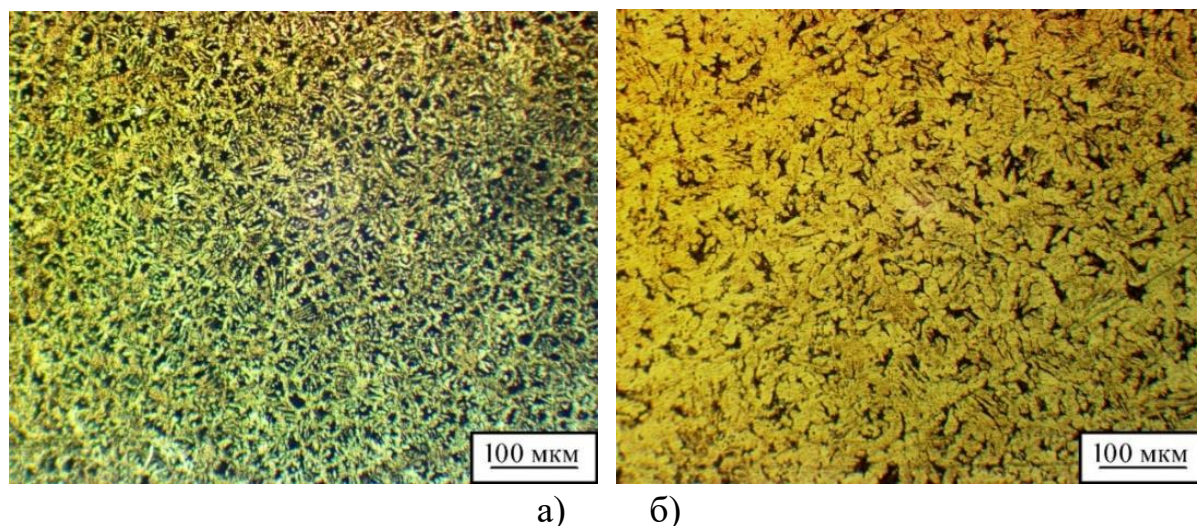


Рисунок 1. – Характерные микроструктуры образцов отливок из сплава БрА10Ж4Н4, полученных различными методами:  
а) – центробежное литье; б) – непрерывное литье

Можно видеть, что алюминиевая бронза состоит из  $(\alpha + \gamma')$  эвтектоида (темные участки) и  $\alpha$ -фазы (светлые участки). Здесь  $\alpha$ -фаза – твердый раствор легирующих элементов в меди,  $\gamma'$  – твердый раствор на базе химического соединения  $\text{Al}_4\text{Cu}_9$  [4]. Структура отливок, полученных методом центробежного литья, более дисперсная (рисунок 1а), по сравнению с отливкой, полученной методом непрерывного литья (рисунок 1б). Указанное отличие в микроструктурах сплавов БрА10Ж4Н4 связано с более высокой скоростью охлаждения при центробежном литье.

Результаты рентгеноструктурного анализа исследуемых образцов отливок из сплава БрА10Ж4Н4 представлены на рисунке 2.

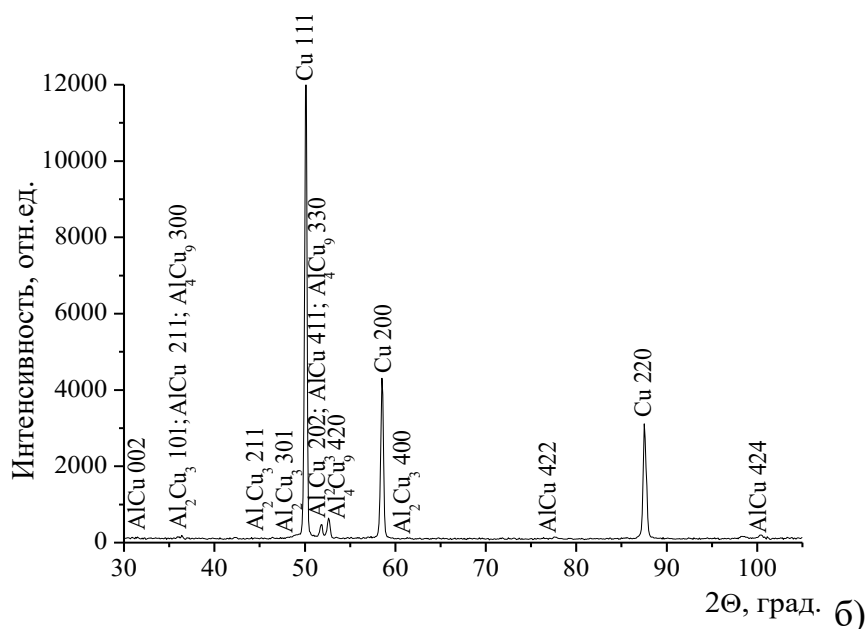
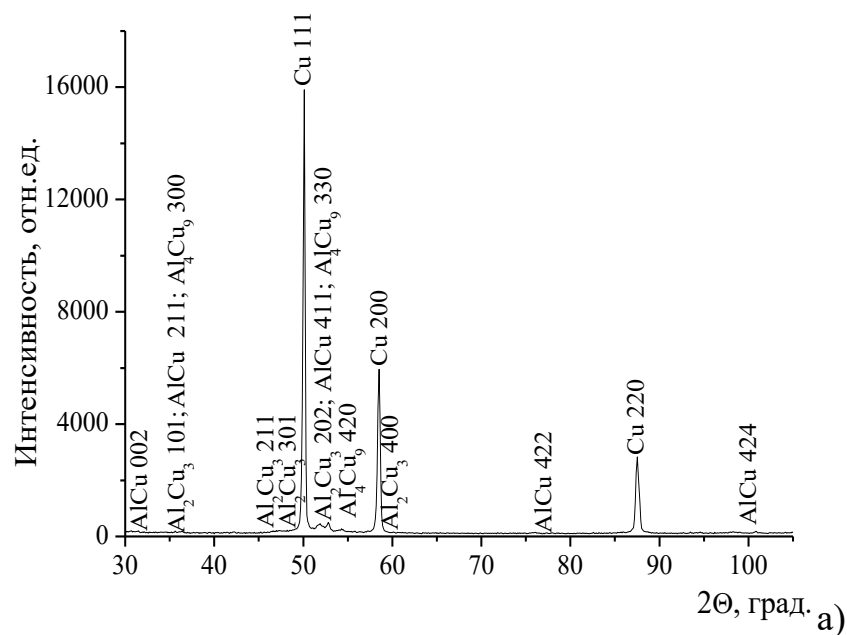


Рисунок 2. – Фрагменты рентгеновских дифрактограмм ( $\text{CoK}_\alpha$ ) от поверхностных слоев отливок из сплава БрА10Ж4Н4, полученных различными методами:  
а) – центробежное литье; б) – непрерывное литье

Приведенные дифрактограммы свидетельствуют о том, что основной фазой отливок из сплава БрА10Ж4Н4 является матричный твердый раствор на основе Cu ( $a=0,3615$  нм) с параметрами кристаллической решетки:  $a=0,3659$  нм (центробежное литье) и  $a=0,3655$  нм (непрерывное литье). Повышенные, по сравнению с Cu, значения параметра кристаллической решетки медной матричной фазы в сплавах вызваны растворенным в ней алюминием, имеющим больший атомный радиус ( $R_{\text{Cu}}=0,0127$  нм,  $R_{\text{Al}}=0,0143$  нм [5]). Таким образом, матричная фаза в сплаве, закристалли-

зованном методом центробежного литья, вследствие более высокого содержания в ней алюминия, имеет повышенное значение параметра кристаллической решетки, по сравнению со случаем непрерывного литья. Также в фазовом составе сплава регистрируются интерметаллидные соединения  $AlCu$  и  $Al_2Cu_3$ .

Твердость отливки при центробежном литье составляет 200 HV 10, при непрерывном литье – 165 HV 10. Повышенное значение твердости отливки, полученной методом центробежного литья, обусловлено образованием более дисперсной структуры при охлаждении, а также большим твердорастворным упрочнением матричной фазы отливки, по сравнению со случаем непрерывного литья.

**Выводы.** Исследовано влияние режимов кристаллизации отливок из сплава БрА10Ж4Н4 на их структуру, фазовый состав и твердость.

Показано, что микроструктура отливок состоит из  $(\alpha+\gamma')$  эвтектоида и  $\alpha$ -фазы. Установлено, что при центробежном литье отливка имеет более дисперсную структуру, вследствие относительно повышенной скорости ее охлаждения, по сравнению со случаем непрерывного литья.

Показано, что отливки содержат матричную фазу на основе твердого раствора легирующих элементов в  $Cu$  и интерметаллидные фазы  $AlCu$ ,  $AlCu_3$ ,  $Al_4Cu_9$ . Сделано заключение, что повышенные значения параметра кристаллической решетки матричного твердого раствора обусловлены его легированностью алюминием.

Установлено, что при центробежном литье, твердость отливок из сплава БрА10Н4Ж4 в 1,2 раза превышает твердость отливок, полученных непрерывным литьем. Указанное явление связано с большей дисперсностью структуры и твердорастворным упрочнением матричной фазы отливки, полученной методом центробежного литья.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Зборщик, А.М. Конспект лекций по дисциплине «Специальные методы литья»/ А.М. Зборщик. – Донецк: ГВУЗ «ДонНТУ», 2007. – 158 с.
2. Рогов, В.А. Материаловедение и технология конструкционных материалов. Штамповочное и литейное производство: учебник для вузов / В. А. Рогов, Г. Г. Позняк. – 2-е изд., – М: Изд-во Юрайт, 2019. – 330 с.
3. Беккерт, М. Способы металлографического травления / М. Беккерт, Х. Клемм. – 2-е изд., – М.: Металлургия, 1988. – 400 с.
4. Гуляев, А.П. Металловедение / А.П. Гуляев. – 6-е изд., перераб. и доп. – Москва: Металлургия, 1986. – 544 с.
5. Барон, Н.М. Краткий справочник физико-химических величин / Н. М. Барон [и др.]. – Л.: Химия, 1983. – 232 с.

## **ПЛАСТИЧНЫЕ СМАЗКИ С ГЕТЕРОГЕННОЙ ДИСПЕРСНОЙ ФАЗОЙ ДЛЯ ТЯЖЕЛОНАГРУЖЕННЫХ И ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ УЗЛОВ ТРЕНИЯ**

**В.И. ЖОРНИК, А.В. ИВАХНИК, А.В. ЗАПОЛЬСКИЙ**

**Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси,  
Минск, Беларусь**

*На примере литиевой смазки показана перспективность применения пластичных смазок с гетерогенной дисперсной фазой в тяжело нагруженных и высокотемпературных узлах трения, что обусловлено их более высокими нагрузочной способностью и термостойкостью, а также улучшенной механической и коллоидной стабильностью по сравнению со смазками аналогичного состава, имеющими одинарную дисперсную фазу.*

Ресурс тяжело нагруженных и высокотемпературных узлов трения мобильных машин и технологического оборудования в значительной степени определяется нагрузочной способностью и термической стойкостью используемых в них смазочных материалов, в качестве которых в широко используются пластичные смазки. Пластичные смазочные материалы (ПСМ) представляют собой сложные композиции, в состав которых входят: дисперсионная среда (ДС) – нефтяные, синтетические и растительные масла или любая жидкость, обладающая смазочными свойствами; дисперсная фаза (ДФ) (загуститель) – соли высокомолекулярных кислот (мыла), твердые углеводороды и др.; наполнители в виде присадок (маслорастворимых веществ) или добавок (нерастворимых в масле мелкодисперсных твердых компонентов, например, порошков графита, дисульфида молибдена, мягких металлов и др.). Дисперсионная среда является основным компонентом пластичной смазки и составляет 75–95% ее массы. Дисперсная фаза (загуститель) создает пространственный каркас, удерживающий за счет адсорбционных сил дисперсионную среду. Наполнители улучшают различные функциональные свойства пластичной смазки [1].

Формирование структуры ДФ ПСМ проходит в две стадии: а) образование первичных мицелл (центров кристаллизации), их рост и развитие до макроассоциатов определенных размеров; б) взаимодействие образующихся макроассоциатов друг с другом с появлением трехмерной

объемной структуры ДФ. Эффективными модификаторами смазочных материалов являются наноразмерные добавки различной природы, однако их введение в ПСМ представляет значительную технологическую сложность, связанную с трехмерной структурой ДФ пластичных смазок и склонностью наночастиц к агрегированию. При введении наночастиц, например, ультрадисперсных частиц алмазно-графитовой шихты ША-А, в ПСМ на стадии охлаждения после образования волокнистого структурного каркаса ДФ смазки, например, из 12-оксистеарата лития (12-LioSt), частицы добавки остаются свободно мигрирующими в ДС (масле) с возможностью объединяться в агрегаты (рис. 1, а).

Повысить эффективность применения наноразмерного модификатора можно путем его введения в реакционную массу до начала процесса кристаллизации ДФ (физический принцип модифицирования) или синтезируя его непосредственно в процессе образования элементов ДФ (химический принцип модифицирования) [2]. В этом случае формирование структурного каркаса протекает с участием наночастиц модификатора, и рост волокон ДФ идет от их поверхности. В результате формируется более разветвленный, с большей прочностью и маслоудерживающей способностью каркас, имеющий гетерогенную структуру, включающую волокна, образованные солью высокомолекулярной кислоты, например, 12-оксистеаратом лития (12-LioSt), и закрепленные в них частицы модификатора. В качестве такого модификатора могут выступать, например, ультрадисперсные частицы алмазно-графитовой шихты (ША-А) (рис. 1, б) или частицы расширенного графита (РГ) (рис. 1, в).

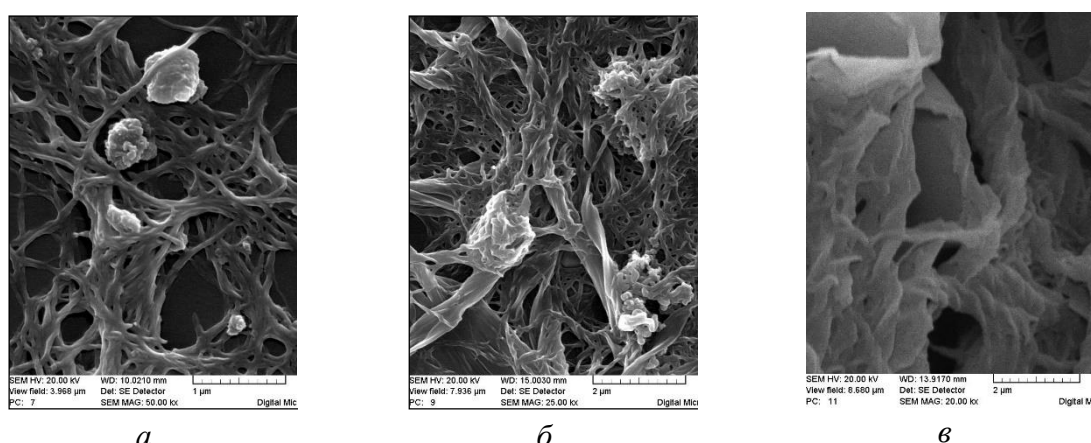


Рисунок 1. – Микроструктура пластичной смазки с одинарной дисперсной фазой 12-LioSt с добавкой частиц ША-А (а) и с гетерогенной дисперсной фазой 12-LioSt – ША-А (б) и 12-LioSt – РГ (в)

В таблице приведено сопоставление параметров смазочной композиции, полученной путем подмешивания добавки расширенного графита (3 масс.%) в состав литиевой смазки со сформированной одинарной мыльной дисперсной фазой 12-LioSt (смазка 1), и литиевой смазки с гетерогенной дисперсной фазой 12-LioSt–РГ, полученной по физическому принципу модифицирования и также содержащей 3 масс.% расширенного графита (смазка 2). Анализ приведенных данных показывает, что нагрузка сваривания для смазки с гетерогенной дисперсной фазой увеличилась с 2600 до 3400 Н, показатель коллоидной стабильности улучшился в три раза (маслоотделение сократилось с 12 до 4 %), значительно возросла механическая стабильность (изменение числа пенетрации у смазки 2 после 100000 циклов нагружения составило 25 ед., а для смазки 1 оно соответствовало 150 ед.). Следует также отметить, что смазка 2 благодаря гетерогенности дисперсной фазы приобрела уникальную термостойкость. Так, у литиевой смазки с одинарной дисперсной фазой 12-LioSt с добавкой частиц РГ температура каплепадения составляет порядка 200 °С, в то время как у смазки с гетерогенной дисперсной фазой 12-LioSt–РГ она превысила 300 °С.

Таблица. – Параметры литиевых смазок с одинарной и гетерогенной дисперсной фазой, содержащих частицы расширенного графита

Номер смазки	Тип дисперсной фазы	Пенетрация, $\cdot 10^{-1}$ мм	Предел прочности, Па, при 20 °С	Коллоидная стабильность, %	Эффективная вязкость при 0 °С и среднем градиенте скорости деформации $10 \text{ с}^{-1}$ , Па·с.	Температура каплепадения, °С	Изменение пенетрации после 100000 ударов, $10^{-1}$	Нагрузка сваривания, Н	Доля свободной щелочи в пересчете на NaOH, %	Кислотное число, мг/г КОН	Коррозионное воздействие на металлы
Смазка 1	одинарная	185	1320	12	120	200	150	2600	отс	15	не выдерживает
Смазка 2	гетерогенная	260	820	4	240	> 300	25	3400	< 0,1	отс.	выдерживает

Таким образом, приведенные результаты исследований показывают перспективность применения пластичных смазок с гетерогенной дисперсной фазой в тяжелонагруженных и высокотемпературных узлах трения мобильных машин и технологического оборудования.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ищук, Ю.Л. Состав, структура и свойства пластичных смазок / Ю.Л. Ищук. – Киев: Наукова думка, 1996. – 516 с.
2. Жорник, В. И. Взаимосвязь структуры дисперсной фазы пластичных смазок с их механической стабильностью / В. И. Жорник, А. В. Ивахник, В. П. Ивахник, М. А. Бухтилова // Актуальные вопросы машиноведения. – 2016. – Вып. 5. – С. 341–345.

**ИМПОРТОЗАМЕЩАЮЩЕЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ДОБЫЧИ  
КАЛИЙНЫХ СОЛЕЙ ПРОИЗВОДСТВА  
ЗАО «СОЛИГОРСКИЙ ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ  
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЯ С ОПЫТНЫМ ПРОИЗВОДСТВОМ»**

**А.В. БРИЖЕВИЧ, Е.В. БОРИС, Е.В. КОДНЯНКО**  
*Солигорский Институт проблем ресурсосбережения  
с Опытным производством, Беларусь*

*ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством» – ведущий национальный разработчик и поставщик импортозамещающего горнодобывающего, обогащительного, подъемно-транспортного и бурового оборудования, а также комплексов складирования и перевалки крупнотоннажных сыпучих материалов. Выпускаемая предприятием техника постоянно модернизируется и обновляется. Эту задачу успешно решает коллектив предприятия и инженерно-технические работники ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством».*

**Введение.** В настоящее время, когда спрос на полезные ископаемые продолжает оставаться высоким, отечественная горнодобывающая промышленность нуждается в современной импортозамещающей высокопроизводительной технике для добычи и переработки калийных солей. На современном рынке горнодобывающего оборудования большое внимание разработкам техники для добычи и переработки калийных солей уделяет ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством» (далее Институт).

ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством» – ведущий национальный разработчик и поставщик импортозамещающего горнодобывающего, обогащительного, подъемно-транспортного и бурового оборудования, а также комплексов складирования и перевалки крупнотоннажных сыпучих материалов.

**Основной текст.** В основу производственной деятельности Института положено использование передовых достижений отечественной и зарубежной науки, а также собственных научно-технических разработок. На предприятии осуществляется весь цикл создания горных машин от научных исследований до опытно-конструкторских разработок и серийного производства, а также ведутся работы в области ресурсосберегающих технологий подземной разработки калийных месторождений.



Приоритетным направлением научно-производственного развития ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством» является производство (рисунок 1):

- горно-шахтных машин и оборудования – проходческих и проходческо-очистных комбайнов и комплексов, машин щеленарезных и погрузочных, маслостанций передвижных;

- оборудования обогагательного – мельниц шаровых и стержневых, дробильно-сортировочных станций, сгустителей, установок сушильных, вакуум-фильтров;

- оборудования для производства гранулированных минеральных удобрений (комплексных и однокомпонентных) – смесителей (шнековых, роторных, барабанных), дробилок, растворителей, охладителей, грануляторов, прессов валковых, линий тукосмешения;

- оборудования и комплексов по перегрузке сыпучих материалов – кратцер-кранов, элеваторов, станций разгрузки сыпучих материалов из железнодорожных вагонов, складских комплексов для сыпучих продуктов, морских и речных терминалов по перегрузке сыпучих материалов;

- оборудования горной автоматики и управления – автоматических систем контроля и управления на базе микропроцессорной техники, электротехнических устройств, пневмоприводов исполнительных органов.

Научные исследования, разработка и выпуск современного импортозамещающего горно-шахтного и другого оборудования стали возможны во многом благодаря созданию и аккредитации испытательного центра.

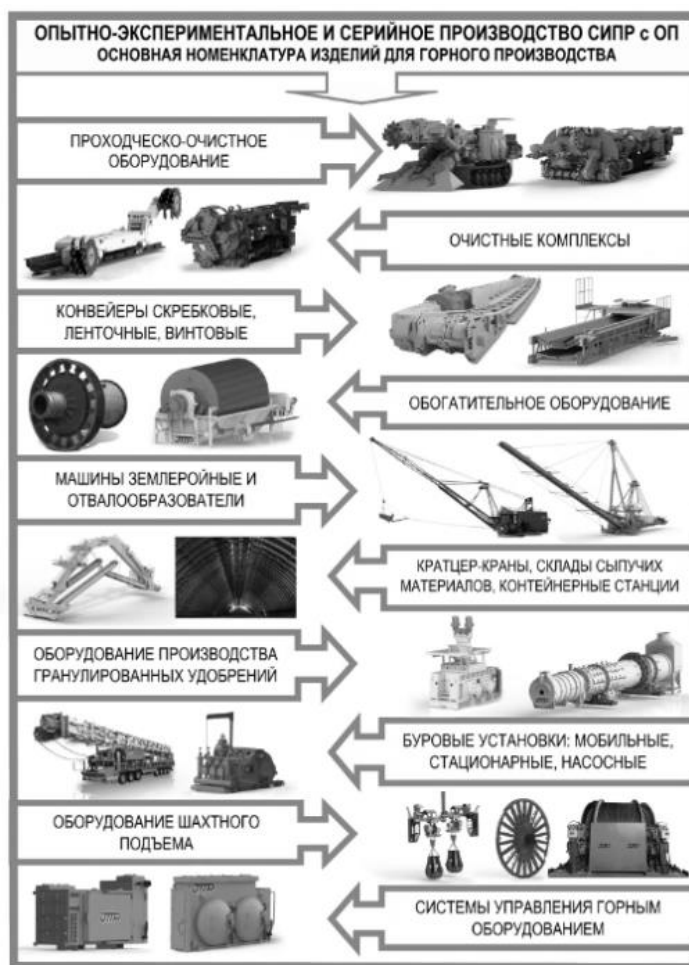


Рисунок 1. – Основная номенклатура продукции ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством»

Коллектив предприятия уделяет большое внимание проблемам повышения надежности горных машин и механизмов. Объектом исследования является изучение актуальных проблем современного состояния и перспектив развития горного машиностроения, которое характеризуется широкой номенклатурой изделий, что обусловлено не только большим разнообразием горных машин, но и стремлением приспособить их к разнообразным горно-геологическим условиям эксплуатации.

Повышение надежности – одна из важнейших задач в горнорудной промышленности, что связано с непрерывным ростом интенсификации технологических процессов горного производства, повышением производительности оборудования и увеличением воздействующих на него нагрузок.

Технический прогресс в горном машиностроении развивается по двум основным направлениям:

- непрерывный рост мощностей, скоростей и производительности каждого агрегата, и в связи с этим, постоянное усложнение конструкций машин, снижение их массы;

- переход от отдельных машин к агрегатам и комплексам оборудования.

Современные горные машины очень сложны в конструктивном отношении, поэтому вопросы удобства обслуживания техники при эксплуатации приобретают исключительное значение. Ремонтопригодность – одно из свойств изделия, которое характеризует его приспособленность к предупреждению, обнаружению и устранению отказов путем проведения технического обслуживания и ремонтов.

Реализация мероприятий по дальнейшему повышению надежности, долговечности горнодобывающего оборудования осуществлялась в следующих направлениях:

- применение лучших компоновочных решений, прогрессивных методов расчета на прочность, унификация узлов и деталей на стадии проектирования и разработки конструкции;

- улучшение структуры применения конструкционных материалов, прогрессивных неметаллических конструкционных материалов;

- обеспечение потребности горнорудных предприятий горными машинами для конкретных горно-геологических условий.

Проведенные исследования позволяют нам сформулировать следующие рекомендации:

- доведение показателей технического уровня разрабатываемой (модернизируемой) продукции до уровня мировых достижений, и полностью отвечающего требованиям потребителя на весь период ее эксплуатации;

– разработка и освоение принципиально новых технологических решений, направленных на повышение надежности и долговечности горного оборудования, разработка новых материалов и процессов, обеспечивающих требуемое качество конечного изделия;

– научно-техническое обеспечение инновационного промышленного производства горно-шахтного оборудования;

– освоение сложных наукоемких технологий, внедрение новых средств измерения и методов активного контроля параметров технологических процессов;

– оказание услуг и выполнение профильных работ научно-исследовательского, проектного, производственного характера, обеспечение послепродажного обслуживания поставляемого оборудования.

**Заключение.** Создание новых моделей шахтного подземного транспорта всегда диктовалось потребностями горнодобывающих предприятий России, Казахстана, Узбекистана и других стран СНГ.

Основным направлением своей производственной политики ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством» считает постоянное повышение технического уровня, качества и надежности выпускаемой продукции, максимальное удовлетворение запросов потребителей, с которыми предприятие связывает многолетнее и плодотворное сотрудничество.

Для решения поставленных задач проводится изучение мирового уровня строительно-дорожной, подземной и специальной техники, а также запросов потребителя. Осуществляется совершенствование продукции с учетом требований и ожиданий рынка.

Выпускаемая предприятием техника постоянно модернизируется и обновляется. Эту задачу успешно решает коллектив предприятия и инженерно-технические работники ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством».

#### ЛИТЕРАТУРА

1. [Электронный ресурс] – Режим доступа : <https://sipr.by/>. – Дата доступа : 10.03.2020.

## ПОВЫШЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ШАХТНЫХ ПОДЪЕМНЫХ УСТАНОВОК

**А.П. ДВОРНИК, Ю.В. КАЛИНЦЕВ**

**Солигорский Институт проблем ресурсосбережения  
с Опытным производством, Беларусь**

*При эксплуатации шахтного подъема возникает сложная проблема, действительный возраст подъемных машин в несколько раз превышает нормативные сроки их эксплуатации. Это просматривается во многих отраслях промышленности. Обосновывается это тем, что у предприятий отсутствуют материальные средства на замену дорогостоящего оборудования новым. За время эксплуатации этого оборудования научные разработки и элементная база ушли далеко вперед. Предлагаются совершенно новые приводы и системы их управления и контроля в плане повышения производительности, надежности, энергопотребления и безопасности.*

Важным и ответственным технологическим объектом рудников и шахт являются подъемные установки, которые обеспечивают выдачу полезного ископаемого, спуск и подъем людей и грузов. От надежной и безопасной работы которых зависит бесперебойная работа всего горнодобывающего предприятия. Любая аварийная ситуация на подъеме ведет к остановке горизонта или рудника. Поэтому проблемам повышения надежности и безопасности эксплуатации шахтных подъемных установок всегда уделяли первостепенное значение.

Однако, за последние годы парк подъемных машин стареет. Так на ОАО «Беларуськалий» 23 подъемные установки из 35 срок службы которых превышает 25 лет. Такой же срок службы имеют и комплектующие подъемных машин – приводы, системы управления этими приводами, ствольная сигнализация и связь. Но также оборудование и армировка шахтного ствола, и другие жизненно важные устройства подъема. Система привода постоянного тока типа Г-Д, которая преимущественно используется на подъемных машинах большой мощности состоит из 4 электрических машин, три из которых коллекторного типа, имеет большие стоимость и энергопотребление.

Основные недостатки и причины замены скиповых шахтных подъемных машин (ШПМ): усталостные трещины на органах навивки, ступицах, на сварных швах ребер; приварены ступицы органа навивки к главному валу создающие дополнительные напряжения в обечайке барабана; недостатки в конструкции тормозных балок в которых сварные швы ребер жесткости сведены в одну точку концентратора напряжений; достаточно сложная регулировка переставной части барабана на машинах БЦК при выравнивании длин канатов; быстрый износ валиков тормозной системы (практически при каждой годовой ревизии и наладке машины требуется замена валиков и втулок по причине увеличенного зазора); тормозная система собрана на устаревший элементной базе, наладку которой выполнить достаточно сложно; высокая энергоемкость привода; не совершенна система регистраторов параметров работы машин и др.

В связи с этим весьма актуальной является задача обеспечения безопасной эксплуатации подъемных установок.

Основными направлениям решения этой задачи являются их замена, модернизация, оснащение шахтных подъемных установок устройствами своевременного обнаружения нарушений в режимах работы и принятия необходимых мер по предупреждению аварий, применения систем защит и блокировок.

Для современных шахтных подъемных машин характерными являются современные тенденции роста грузоподъемности, максимальных скоростей перемещения подъемных сосудов, увеличения глубин шахт, увеличения диапазона регулирования частоты вращения двигателей электроприводов.

В общем случае граница целесообразного применения редукторного и безредукторного электроприводов определяется по результатам исследований с учетом многих факторов стоимости и целесообразности.

Хорошая конструкция, при качественном монтаже, квалифицированно налаженная и тщательно обслуживаемая подъемная установка должна работать стабильно и безопасно [1].

Для безопасной и надежной работы подъемных установок, своевременного обнаружения нарушения режимов работы и принятия необходимых мер по предупреждению аварии используют систему защиты и блокировки, являющуюся составной частью системы управления.

Взаимоувязанное действие защит и блокировок позволяет избежать предупредить аварии на подъемных установках.

Элементы защиты подъемных установок, как правило, реагируют на предельное отклонение основных параметров системы (ток, скорость, ве-

личину напуска каната, переподъем и т.д.), действие защиты проявляется во включении предохранительного тормоза и прекращении технологического процесса. В то же время защита не должна мешать нормальной работе подъемной установки. Это обстоятельство предъявляет повышенные требования к элементам защиты. Однако имеются случаи аварий на ряде подъемных установок по причине принципиально неверно выполненной защиты, отсутствия самоконтроля, несовершенства отдельных аппаратов защиты и блокировки, и периодических проверок их элементов [2].

Требования предъявляемые к аппаратам защиты и блокировки: высокая надежность; постоянная готовность к работе; проверка готовности аппаратов должна осуществляться как в ручном, так и в автоматическом режиме; простота настройки с обеспечением ее фиксации; отсутствие ложных срабатываний (высокая надежность отдельных элементов и аппаратов защиты в целом), стабильность работы; должны быть исключены срабатывания защитных устройств вследствие их чрезмерной чувствительности к контролируемому параметру; охват как можно большего числа защищаемых параметров.

Анализ аварий на подъемных установках свидетельствует о необходимости расширить диапазон защитных функций - аппаратура защиты должна реагировать, если не удовлетворяется хотя бы одно из требований, устанавливаемых для основных и второстепенных параметров системы, иметь высокую степень самоконтроля элементов и электрических цепей [3].

При проектировании аппаратов защиты должны использоваться методы, основанные на определении реакции аппаратов защиты на специальные контрольные и рабочие сигналы.

Срабатывание аппаратов защиты и блокировки должно вызывать включение предохранительного тормоза, предупредительной сигнализации или накладывать запрет на последующий цикл.

Система защит и блокировок подъемных установок может быть разделена на следующие основные группы:

- защиты, требующие немедленного включения предохранительного тормоза. Эти защиты выполняются с высокой степенью самоконтроля и отличаются высокой надежностью.
- защиты, позволяющие завершить цикл подъема, но запрещающие дальнейшую работу;
- защиты, сигнализирующие о неисправности элементов оборудования подъемной установки, которые допускают работу подъемной установки со сниженными параметрами без уменьшения надежности и безопасности до остановки ее на ремонт.

Кроме защит, схема управления должна иметь систему блокировок, препятствующих выполнению какой-либо операции, влекущей за собой аварийный режим подъемной установки.

Дальнейшая интенсификация работ в горнорудной промышленности требует применения высокопроизводительной техники, механизации и автоматизации производственных процессов, совершенствования средств защиты, связи, сигнализации и повышения безопасности работ.

Требования потребителя сводятся к применению современных приводов по безредукторной схеме компоновки привода состоящих из: синхронного электродвигателя с напряжением сети питания – 10 кВ; полупроводниковой силовой преобразовательной техники, совместимой по программному обеспечению с микропроцессорным контроллером управления; микропроцессорной системой регулирования и управления, защит и блокировок, диагностики и контроля с развитым интерфейсом «человек-машина»; цифрового (микропроцессорного) устройства контроля параметров подъемной машины (регистратора параметров); аппаратуры системы стволовой сигнализации и связи и др. компонентов шахтной подъемной машины.

Программируемые контроллеры типа S7 Сименс могут включать в свой состав:

- модуль центрального процессора (CPU). В зависимости от степени сложности решаемых задач в программируемом контроллере могут использоваться более 20 типов центральных процессоров.

- блоки питания (PS) для питания контроллера от сети переменного или постоянного тока.

- сигнальные модули (SM), предназначенные для ввода и вывода дискретных и аналоговых сигналов, в том числе Fail Safe и модули со встроенными Ех-барьерами.

- коммуникационные процессоры (CP) - интеллектуальные модули, выполняющие автономную обработку коммуникационных задач в промышленных сетях AS-Interface, PROFIBUS, Industrial Ethernet, PROFINET и системах РtР связи. Применение дополнительного программного обеспечения позволяет расширить коммуникационные возможности контроллера поддержкой обмена данными в сетях MODBUS RTU, MODBUS/TCP, BACnet и KNX/ EIB, Для работы в системах телеуправления S7-300 может дополняться аппаратурой и программным обеспечением SINAUT ST7 и SIPLUS RIC.

- функциональные модули (FM) - интеллектуальные модули, оснащенные встроенным микропроцессором и способные выполнять задачи ав-

томатического регулирования, взвешивания, позиционирования, скоростного счета, управления перемещением и т.д.

Имеют высокую мощность благодаря наличию большого количества встроенных функций.

Универсальный модульный программируемый контроллер имеет свободное наращивание функциональных возможностей при модернизации системы управления для максимальной адаптации к требованиям решаемой задачи.

Комплексное решение проблемы развития электропривода шахтных подъемных машин в направлении повышения их эффективности работы является актуальным.

Анализ «Правил промышленной безопасности при разработке подземным способом соляных месторождений Республики Беларусь» показывает, что глава 31 «Подъемные машины и лебедки» нуждается в переработке с учетом вышесказанного, что повысит требования к системам приводов и их управления и соответственно повысит уровень безопасности подъема [4].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Руководство по ревизии, наладке и испытанию шахтных подъемных установок/ под общ. ред. В.А. Корсуна, Г.Д. Трифанова.– 4-е изд., перераб. и доп. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2014. – 616 с., с ил.
2. Стрелков М.А., Кузнецов В.С. Применение регистраторов параметров для оценки остаточного ресурса шахтных подъемных установок // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). Отдельный выпуск №16: Горная механика и транспорт. – М.: Горная книга, 2009. – С. 332-338.
3. Стрелков М.А. Метод определения основных характеристик шахтных подъемных установок в режиме реального времени // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). –М.: Горная книга, 2011. – №4. – С. 314-318.
4. Правила промышленной безопасности при разработке подземным способом соляных месторождений Республики Беларусь. 2012 г. с изм. 20.03 2014. Постановление МЧС Республики Беларусь от 10.04.2014 г. № 10



## АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПАЙКОЙ

**И.Б. ОПАРИНА, А.Г. КОЛМАКОВ,**

*Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН,  
Москва, Россия*

**И.М. ХЕЙФЕЦ**

*Институт подготовки научных кадров НАН Беларуси,  
Минск, Беларусь*

*Автоматизированные системы управления на технологических участках производства обеспечивают высокую производительность, точность и качество исполнения, сокращение затрат и другие важные для потребителя результаты. Широкий выбор средств автоматизации позволяет решать практически неограниченный класс технологических задач. На примере автоматизации процесса пайки изделий показано как строится технологическая последовательность, которой управляет система автоматики.*

Подходы к решениям задач автоматизации технологических процессов в современных условиях настолько широки и подвержены обновлению практически с такой же скоростью, как и в современных устройствах мобильной связи. Не так давно поддержание рабочего режима технологического процесса было значимым условием при разработке системы. Сейчас система управления строится как открытая платформа с возможностью наблюдения, контроля и управления оборудованием, а также оповещения оператора. Набор опций системы каждый разработчик формирует по своему усмотрению с учетом их персональной значимости. Так для установки индукционной пайки потребовалась разработать автоматизированную систему мониторинга и управления технологическим процессом.

При разработке технического задания на проектирование системы автоматизации учитывались технологические задачи:

- проведение пайки в вакууме и в газовой среде;
- охлаждение изделия в защитной атмосфере;
- выбор времени охлаждения;
- прижим частей изделия с заданным усилием;
- выбор времени полного цикла работы.

**Система управления.** Основу системы управления составляет панельный контроллер, например СПК107 с сенсорным дисплеем. Контроллер может устанавливаться либо на самой установке, либо в шкафу управления. СПК107 удобен тем, что объединяет в одном корпусе функции программируемого контроллера с панелью оператора (ПЛК+HMI).

Контроллер соединяется с компьютером по Ethernet. В SCADA-системе на ПК создаются мнемосхемы для отображения основных показателей. Например, на какой стадии исполнительный программы в данный момент времени находится процесс, или в какой среде происходит пайка.

Мониторинг работы можно вести не только на ПК, но и в облачном сервисе, например в OwenCloud. Сбор данных с датчиков (давление, разряжение, положение) и кнопок управления осуществляется модулями аналогового ввода MB110-224.8A и модулями дискретного ввода MB110-224.16ДН по интерфейсу RS-485.

Управление пневматическими исполнительными механизмами, системой вакуумной откачки и напуска газа ведется с помощью модулей аналогового вывода МУ110-224.8И и модулей дискретного вывода МУ110-224.16Р. Модули и источник питания соединены с панельным контроллером интерфейсом RS-485. Обмен данными осуществляется по протоколу Modbus RTU. Источником питания высокой частоты управляет контроллер. Структурная схема системы управления показана на рис. 1.



Рисунок 1. – Структурная схема системы управления

На экран СПК107, как в SCADA-системе, могут выводиться мнемосхемы управления камерой, пневматической системой, системой вакуумной откачки и источником питания высокой частоты. Всплывающие окна содержат подсказки, отображается текущий этап, состояния и положения устройств и механизмов. Контроллер имеет возможность архивировать события, настройки параметров технологического процесса (время пайки, остаточное давление в камерах и т.д.).

Установка может работать как в ручном, так и в автоматическом режимах. Переключение режимов осуществляется при помощи виртуального переключателя. Для возможности оперативного управления часть функций дублируется устройствами MeyerTec – кнопками управления, сигнальными лампами, джойстиками.

Система управления обеспечивает:

- сбор технологических параметров от первичных преобразователей;
- архивирование параметров;
- удаленный мониторинг;
- аварийный режим.

**Технологический цикл.** Процесс пайки начинается с загрузки заготовок и припоя в индуктор камеры. Запускается вакуумный насос, камера герметизируется, заготовки сдавливаются пневматическим прижимом, и выполняется вакуумная откачка. Остаточное давление в камере контролируется и регистрируется датчиком разряжения, сигнал с которого поступает в систему управления. При достижении заданного уровня разряжения происходит контролируемый напуск защитного газа до установленного давления, после чего начинается процесс пайки. Одновременно с ведением технологического процесса на первом посту идет подготовка к работе на втором.

После пайки камера через специальные клапаны продувается инертным газом, с прижимных цилиндров снимается давление, и изделие высвобождается. Готовое изделие извлекается и загружаются новые заготовки. Выбирается время цикла. Отладка новой технологии осуществляется в ручном режиме. На мнемосхемах настраиваются новые элементы: кнопки управления механизмами, локальными системами.

Таким образом, на базе микропроцессорных средств управления создана полнофункциональная система управления сложным объектом - установкой индукционной пайки. В результате обеспечивается автоматизация процесса пайки с высокой степенью надежности и возможностью удаленного мониторинга.

Секция 2  
**МЕХАНИЧЕСКАЯ И ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКАЯ  
ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ**

УДК 621.762:669.154

**СТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ТЕРМОБАРИЧЕСКИ  
ОБРАБОТАННЫХ МЕТАЛЛОМАТРИЧНЫХ КОМПОЗИТОВ НА  
ОСНОВЕ АЛЮМИНИЯ И СПЛАВА ПГ-СР4 С ДОБАВКОЙ  
НАНОСТРУКТУРНОГО КУБИЧЕСКОГО VN**

**П.А. ВИТЯЗЬ, В.Т. СЕНЮТЬ, М.Л. ХЕЙФЕЦ, А.Г. КОЛМАКОВ**

*Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси,  
Минск, Беларусь*

*ОАО «НПО Центр» НАН Беларуси, Минск, Беларусь  
Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН,  
Москва, Россия*

*Проведено исследование структуры и микротвердости металло-матричных композитов на основе алюминия и самофлюсующегося сплава ПГ-СР-4, синтезированных в условиях термобарической обработки с добавками наноструктурного кубического VN. Показано, что сочетание высокого давления, температуры и модифицирования позволяет снизить размер структурных составляющих сплавов и увеличить их микротвердость.*

Изменения строения и свойств структур металлов и сплавов во времени определяются, прежде всего, температурой, а также давлением и другими интенсивными факторами их образования. Процессы, происходящие при обработке, описываются теорией термической обработки металлов, отражающей кинетику превращений при различных температурах и влияющие на ее ход факторы. Всестороннее давление до настоящего времени активно не применялось для управления структурообразованием в материалах. Сдерживают применение обработки давлением для формирования структур в металлах и сплавах технологические сложности управления процессом и недостаточная ясность, насколько эффективно может быть использовано давление для получения особых свойств материалов [1].

Добавки микро- и наноструктурных тугоплавких частиц в качестве примесных модификаторов позволяют эффективно изменять структуру металломатричных композиционных материалов (КМ), способствует ее измельчению и повышению механических и триботехнических характери-

стик. Согласно принципу Шарпи, которому наиболее твердые структурные составляющие с низким коэффициентом трения и малой склонностью к задирам должны залегать в виде изолированных друг от друга включений, а наиболее вязкие – образовывать сплошную матрицу. Это обеспечивает высокие антифрикционные и износостойкие свойства композита, а также его прочность, вязкость и другие эксплуатационные свойства, предъявляемые к металло-матричным материалам [2].

В качестве модифицирующих добавок достаточно эффективно используются нанопорошки  $Al_2O_3$ , SiC, TiN, TiCN, WC и др. [3]. Широкое применение для этих целей также получили углеродные наноматериалы, в т. ч. наноалмазы [4]. Применение в качестве модификатора кубического BN, уступающего алмазу по твердости, но обладающего более высокой термостойкостью и химической инертностью, будет способствовать повышению физико-механических и эксплуатационных свойств разрабатываемых материалов.

**Цель работы** – изучение влияния давления, температуры, а также добавок наноструктурного кубического BN на структуру и микротвердость металло-матричных КМ ( $Al+cBN$  и ПГ-CP4+cBN).

В качестве наполнителя применяли наноструктурный порошок BN, полученный на основе микропорошка гексагонального BN (hBN) после механоактивации, термобарического синтеза, дробления и химической очистки спеков. Порошок с размером частиц cBN в пределах 100–200 нм состоит из агрегатов до 1–2 мкм и наряду с кубическим BN содержит остаточный hBN. Термобарическую обработку реакционных шихт осуществляли в аппарате высокого давления «наковальня с лункой» при давлении до 2 ГПа и температуре до 1100 °С в течение 20 с. Нагрев образцов производили путем прямого пропускания электрического тока через шихту. На полученных компактах были приготовлены шлифы, которые затем исследовали методами оптической и сканирующей электронной микроскопии. Микротвердость измерялась на микротвердомере ПМТ-3 алмазным индентором по шкале Виккерса с нагрузкой на индентор 50 г. Количество добавки порошка модификатора в шихте варьировали в пределах 1–5 мас. %.

*Синтез алюмоматричного КМ+cBN.* Основой сплава послужила алюминиевая пудра с толщиной частиц до 0,5 мкм и средним линейным размером до 30 мкм. В результате металлографических исследований АКМ, полученных с добавкой 1,5 мас.% cBN при температурах 650–800 °С было установлено, что их структура достаточно неоднородна: частицы BN собраны в конгломераты от 1 до 20–30 мкм, расположенные по границам

зерен алюминия. Повышение концентрации BN до 5 мас.% приводит к увеличению в материале доли более мелких конгломератов частиц (1–5 мкм), уменьшению размеров крупных включений до 10–20 мкм, при их равномерном распределении в алюминиевой матрице.

Как показал металлографический анализ, размеры зерен алюминия в среднем составляют 10–30 мкм, что можно объяснить совместным влиянием высокого давления и модифицирующим воздействием наполнителя на структуру композита. При этом рост температуры до 800 °С приводит к увеличению микротвердости материала. Максимальная микротвердость КМ, содержащего 1,5 мас.% и 5 мас.% наноструктурного cBN при температуре 800 °С составляет 400–410 МПа и 420–430 МПа соответственно. С ростом температуры свыше 1000 °С в материале с различным содержанием cBN (1,5–5 мас.%) происходит рекристаллизация cBN с образованием частиц cBN размером до 10 мкм, обладающих огранкой, характерной для микропорошков cBN [5].

*Синтез КМ ПГ-СР4+cBN.* Для экспериментов использовали порошок ПГ-СР4 класса М (ГОСТ 21448-75). В результате металлографических исследований сплава, полученного с добавкой 1,5 мас.% cBN, было установлено, что структура КМ однородна, частицы cBN собраны в конгломераты размером до 30 мкм и достаточно равномерно распределены в матрице. Результаты измерений микротвердости показали, что в среднем ее значения выросли на 18–32 % с 10–10,5 ГПа для образцов без модификатора до 11,8–13,7 ГПа для материала, полученного с добавкой наноструктурного cBN.

Для сравнения были проведены эксперименты по спеканию при данных технологических параметрах сплава ПГ-СР4 с добавкой 1–5 мас. % микропорошков cBN зернистостью 60/40 мкм. Было установлено, что в этом случае микротвердость образцов составила 6,4–7,1 ГПа, что в 1,5–2 раза ниже, чем при введении наноструктурного BN.

Таким образом, результаты работы показали перспективность использования высокого давления в сочетании с наноструктурным cBN в качестве модификатора алюминиевых и хромо-никелевых сплавов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Научные основы материаловедения / Б.Н. Арзамасов [и др.]. – Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1994.
2. Технологии конструкционных наноструктурных материалов и покрытий / П. А. Витязь [и др.]; под общ. ред. П.А.Витязя и К.А.Солнцева. – Минск: Белорус. наука, 2011. – 283 с.

3. Курганова, Ю.А. Конструкционные металломатричные композиционные материалы: учебное пособие / Ю.А.Курганова, А.Г.Колмаков. – Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. – 141 с.

4. Модифицирование материалов и покрытий наноразмерными алмазосодержащими добавками / П. А. Витязь [и др.]; под общ. ред. П.А.Витязя. – Минск: Белорус. наука, 2011. – 522 с.

5. Витязь, П. А. Получение алюмоматричного композиционного материала, модифицированного наноструктурным кубическим нитридом бора / П.А. Витязь, В.Т. Сенють, М.Л. Хейфец, А.Г. Колмаков // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2018.– Т. 63.– № 3. – С. 271–279.

## **ТЕХНОЛОГИЯ ЦЕНТРОБЕЖНОЙ ИНДУКЦИОННОЙ НАПЛАВКИ ПОКРЫТИЙ НА ДЕТАЛИ ХОДОВЫХ СОПРЯЖЕНИЙ ПУТЕВОЙ ТЕХНИКИ**

**К.Е. БЕЛЯВИН**

*Белорусский национальный технический университет,  
Минск, Беларусь*

**М.А. БЕЛОЦЕРКОВСКИЙ, И.А. СОСНОВСКИЙ, А.А. КУРИЛЁНОК**  
*Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси,  
Минск, Беларусь*

*Рассмотрена технология центробежной индукционной наплавки порошковых покрытий на детали ходовых сопряжений путевой техники с использованием результатов теоретических исследований процесса проплавления порошковых слоев при индукционном нагреве.*

На предприятиях железнодорожного транспорта РБ используется широкая номенклатура деталей машин и устройств, которые содержат в своем исполнении узлы трения триботехнического назначения, работающие в режиме интенсивного абразивного изнашивания.

К таким узлам трения относятся, например, детали ходовых сопряжений рабочих органов путевых машин высшего класса сложности, предназначенных для выправки, подбивки, отделки пути и очистки щебня (втулки подбивочных блоков, гайки подъема электромагнитов машин типа ВПР и ВПО и др.).

Задачей исследований, проведенных в данной работе, является повышение работоспособности и срока службы антифрикционных изделий ходовых сопряжений рабочих органов путевой техники. Решение этой задачи осуществлялось путем разработки новой высокоэффективной технологии индукционной наплавки порошковых покрытий с использованием результатов теоретических исследований процесса проплавления порошковых слоев при индукционном нагреве.

Одним из эффективных способов формирования порошковых покрытий в холодном и горячем состоянии непосредственно во внутренней полости стальной заготовки-матрицы является центробежная индукционная наплавка [1-2]. Известно, что в основе индукционной центробежной



наплавки порошковых слоев лежит технологическая схема, позволяющая реализовать следующую последовательность нанесения слоев порошковых покрытий. Сначала, с помощью индукционных токов, происходит разогрев вращающейся стальной цилиндрической заготовки до температур возможного фазового перехода из твердого в жидкое состояние материала частиц порошка. Затем в результате изотермической выдержки и теплообмена между разогретой внутренней поверхностью стальной цилиндрической заготовки и прижимаемого к ней центробежными силами порошка происходит послойное его расплавление с образованием после кристаллизации и охлаждения порошковых покрытий. Такая последовательность процесса нанесения порошковых слоев позволяет полагать, что технологические режимы индукционной центробежной наплавки определяются такими технологическими параметрами, как длительность процесса, мощность и частота электромагнитного излучения индуктора, а также линейными размерами стальной цилиндрической заготовки, мощностью создаваемого на ее поверхности теплового источника, удельным сопротивлением, плотностью и теплопроводностью стали.

В результате наших исследований установлено, что распределение температуры в расплавленной зоне будет определяться зависимостью:

$$T_1(r, \tau) = - \frac{b\tau \ln \frac{r}{\eta} + (T_{nl} + b\tau) \ln \frac{\eta}{R} - T_{nl} \ln \frac{R}{\eta}}{\ln \frac{R}{\eta}}, \quad (1)$$

где:  $T_1$  – температуры жидкой фазы (расплава), К;  
 $T_{nl}$  – температура плавления присадочного материала, К;  
 $r$  – текущая координата, м;  
 $R$  – радиус внутренней поверхности заготовки, м;  
 $\eta$  – расстояние от оси вращения до границы плавления, м;  
 $\tau$  – время, с;  
 $b$  – темп нагрева, К/с.

На основании полученной зависимости (1) и уравнения теплопроводности можно получить дифференциальную зависимость:

$$-\lambda_1 \frac{b\tau}{\eta \ln \frac{R}{\eta}} = \rho\gamma \frac{d\eta}{d\tau}, \quad (2)$$

где:  $\lambda_1$  – коэффициент теплопроводности жидкой фазы, Вт/м·К;  
 $\gamma$  – удельная теплота плавления присадочного материала, дж/кг;  
 $\rho$  – плотность присадочного материала, кг/м<sup>3</sup>.

Отсюда получим трансцендентное алгебраическое уравнение:

$$\eta^2 \ln \frac{R}{\eta} - \frac{1}{2}(R^2 - \eta^2) = -\frac{\lambda_1 b}{\rho \gamma} \tau^2, \quad (3)$$

которое определяет зависимость между координатой фронта плавления  $\eta$  и временем  $\tau$ .

Для проплавленного порошкового слоя при  $\eta = R_0$  решение (2) примет вид:

$$\tau = \frac{\rho \gamma_2}{b \lambda_1} \left[ \frac{1}{2}(R^2 - R_0^2) - R_0^2 \ln \frac{R}{R_0} \right], \quad (4)$$

где  $R_0$  – наружный диаметр заготовки, м.

Вышеизложенная модель устанавливает связь между технологическими параметрами индукционного нагрева и динамикой перехода из твердого состояния в жидкофазное состояние порошкового слоя на основании модельных допущений Лейбензона и Лыкова.

Проведенные исследования использованы при разработке технологического процесса и оборудования (рисунок 1) для изготовления двухслойных антифрикционных изделий (биметаллических втулок подбивочных блоков и гаек подъема электромагнитов путевых машин ВПР и ВПО) центробежным индукционным методом с использованием разработанных составов антифрикционных композиционных порошковых смесей повышенной износостойкости.

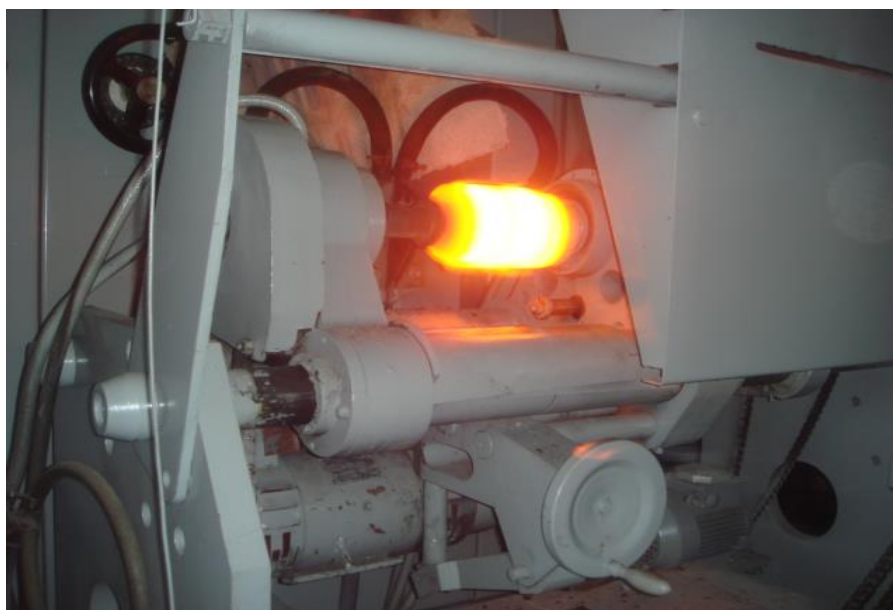


Рисунок 1. – Процесс изготовления двухслойного антифрикционного изделия (биметаллической втулки подбивочного блока выправочно-подбивочно-рихтовочной машины ВПР)

## ЛИТЕРАТУРА

1. Белявин, К.Е. Индукционный нагрев в процессах центробежного нанесения покрытий / К.Е. Белявин, И.А. Сосновский, А.Л. Худолей. – Минск: // Вестник фонда фундаментальных исследований, 2013. – № 3 (36) – С. 70–87.
2. Sosnovskiy, I.A. Induction centrifugal surfacing of the charge based on tin bronze powders with the addition of finely dispersed boehmite / I.A. Sosnovskiy, A.A. Kurilenok, M.A. Belotserkovskiy, O.O. Kuznechik // Welding International, Vol.30, № 9, 2016. – P. 736-739.

**ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛУСИНТЕТИЧЕСКИХ СМАЗОЧНО-ОХЛАЖДАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СРЕДСТВ  
ДЛЯ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ**

**Л.М. АКУЛОВИЧ, Л.Е. СЕРГЕЕВ, М.А. ЗАЛУЦКИЙ**

**Белорусский государственный аграрный технический университет,  
Минск, Беларусь**

*Важнейшим требованием к смазочно-охлаждающим технологическим средствам (СОТС) при магнитно-абразивной обработке (МАО) является удаление из зоны обработки шлама, состоящего из продуктов диспергирования обрабатываемого материала и износа ферроабразивных зерен. Применение синтетических СОТС и эмульсолов для МАО характеризуется снижением интенсивности процесса резания из-за засаливания режущей кромки инструмента. Альтернативой указанным СОТС являются полусинтетические с кинематической вязкостью (30÷40) сСт, и добавкой нефтяного масла до 10 %.*

Применение СОТС при финишной абразивной обработке поверхностей деталей решает ряд задач, основными из которых являются: уменьшение температуры в зоне обработки, снижение шероховатости обработанной поверхности, удаление продуктов диспергирования материала из зоны резания. Рекомендации по применению СОТС того или иного состава носят, как правило, эмпирический характер, базирующийся на конкретных условиях абразивной обработки. Однако, несмотря на большое количество разработанных составов СОТС, задача прогнозирования их использования для МАО во многом еще не решена.

При магнитно-абразивной обработке важнейшей функцией СОТС является удаление из зоны обработки и с поверхности детали пленки шлама, состоящей из продуктов диспергирования материала и частиц износа и разрушения зерен ферроабразивного порошка (ФАП). Проблема реализации указанной функции состоит в неуправляемом изменении свойств СОТС под действием нестационарного электромагнитного поля (ЭМП).

Механизм действия ЭМП на СОТС при МАО представляется следующим образом: в СОТС происходит разрушение агрегатов, состоящих из субмикронных ферромагнитных частиц Fe, находящихся в определенной концентрации, которая по мере увеличения продолжительности процесса МАО возрас-

тает, так как зерна ФАП обладают ферромагнитной матрицей. Подобное разрушение агрегатов приводит к резкому повышению центров кристаллизации масляных глобулей и формированию на поверхности ферроабразивных частиц пузырьков газов микронных размеров, обеспечивая газлифтный эффект. В результате разрушения агрегатов парафинированные масляные глобули выпадают в виде тонкодисперсной и объемной взвеси, осаживаемой на микрорельефе зерен ФАП. Определенную роль при этом играет повышение температуры в зоне обработки, но решающим фактором более быстрого засаливания ФАП при МАО, в отличие от шлифования, выступает значительное ускорение коагуляции и коалесценции масляных глобулей под действием ЭМП.

В настоящее время для МАО в качестве СОТС применяются эмульсии на основе эмульсолов ЭТ, ЭГТ, Э-2. Однако, наличие грубодисперсной ((1,0 ÷ 0,1) мм) фазы таких эмульсий приводит к прекращению фильтрации СОТС ферроабразивной «щеткой» [1]. Движение СОТС под влиянием градиента давления производится вынужденным путем через нерегулярно расположенные поры между частицами ФАП. Нерегулярность порового распределения обусловлена морфологией частиц ФАП и их перемещением относительно обрабатываемой поверхности детали в трех координатных плоскостях, что обеспечивает перекрытие порового пространства как функции от времени. Это приводит к изменению проницаемости СОТС по причине изменения сопротивления ФАП, в том числе и гидравлического, которое в свою очередь определяется течением СОТС в капиллярах пористой среды [2, 3]. Интенсивность накопления субстрата обработки после МАО зависит от соотношения частиц субстрата и поровых сужений (горло поры). В случае если характерный размер частиц субстрата больше характерного размера порового сужения, то частицы оседают на поверхности ФАП, образуя внешнюю фильтрационную корку с отсутствием проницаемости. В массе порошка имеет место расслоение СОТС, масляная составляющая концентрируется в зоне обработки и на поверхности детали, увеличивает вязкость и прочность пленки. В итоге снижается интенсивность процессов резания и выравнивания обработанной поверхности, а также затрудняется ее очистка-мойка.

Поэтому следующим фактором подбора СОТС для МАО является уменьшение вязкости, но это приводит при сохранении развитого микрорельефа частиц ФАП, к падению диспергирующей и смазывающей способностей. Исследованиями [4] установлено, что наиболее приемлемой заменой СОТС с высокой вязкостью является введение в их состав поверхностно активных веществ (ПАВ) на базе гликолей. Однако синтетические СОТС СинМА-1 и СинМА-2, ТУ 38.5901176-91, изготовленные на основе

ПАВ и синтетических жирных кислот, обладая рядом положительных свойств, при своем использовании не обеспечивают такой производительности, как эмульсии, что приводит к повышенному износу частиц ФАП режущего контура. Стоимость данных СОТС ввиду резкого удорожания их компонентов в современных условиях оказывается достаточно высокой, что снижает конкурентоспособность изделий, поверхности которых обработаны методом МАО.

Требуемыми свойствами обладают представители полусинтетических СОТС, которые в своем составе имеют некоторое количество нефтяных масел. Примером эффективного использования полусинтетических СОТС при МАО является применение Аквапол-1 ТУ 38.1011061-86, диапазон значений кинематической вязкости которых составляет  $(30 \div 40)$  сСт и в состав которого входят  $5 \div 10$  % нефтяного масла [1]. Полусинтетические СОТС позволяют ограничить использование нефтепродуктов. К достоинствам полусинтетических СОТС относятся более высокие охлаждающая способность и пожаробезопасность, меньшая токсичность, низкая стоимость. Кроме того, они в полной мере отвечают современным требованиям производства и представляют собой равноценную замену эмульсиям, широко применяемым в различных отраслях машиностроения, в том числе и для МАО [5].

Таким образом, в качестве СОТС для МАО рекомендуется использовать класс полусинтетических СОТС, в состав которых входит небольшое количество (до 10%) нефтяных масел. Применение таких СОТС при МАО позволяет обеспечить стабильность моющих свойств при увеличении диспергирующей способности, что позволяет осуществлять МАО различных материалов при учете ковариантности свойств ФАП и СОТС и отсутствии накопления субстрата обработки после МАО.

#### ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акулович, Л. М. Магнитно-абразивная обработка сложнопрофильных поверхностей деталей сельскохозяйственных машин / Л. М. Акулович, Л. Е. Сергеев. – Минск : БГАТУ. – 2019. – 272 с.
2. Швидлер, М. И. Статистическая гидродинамика пористых сред / М. И. Швидлер. – М. : Недра. – 1985. – 288 с.
3. Куршин, А. П. Гидравлическое сопротивление насыпных слоев при фильтрации жидкости / А. П. Куршин, Л. В. Гусева // Теплоэнергетика. – 1989. – № 9. – С. 51.
4. Концентрат смазочно-охлаждающей жидкости для магнитно абразивной обработки металлов : а. с. № 1300931 СССР / Б. С. Шаповал, И. Б. Фролова, И. С. Гирняк, Н. Я. Скворчевский // Открытия. Изобретения. – 1985. – № 1. – 3 с.
5. Astakhov V.P., Joks S. Metalworking fluids (MWFs) for cutting and grinding – Woodhead Publishing Limited. – 2012. – 424 p.

## **МНОГОЦЕЛЕВАЯ ОБРАБОТКА ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ НА СТАНКАХ С ЧПУ**

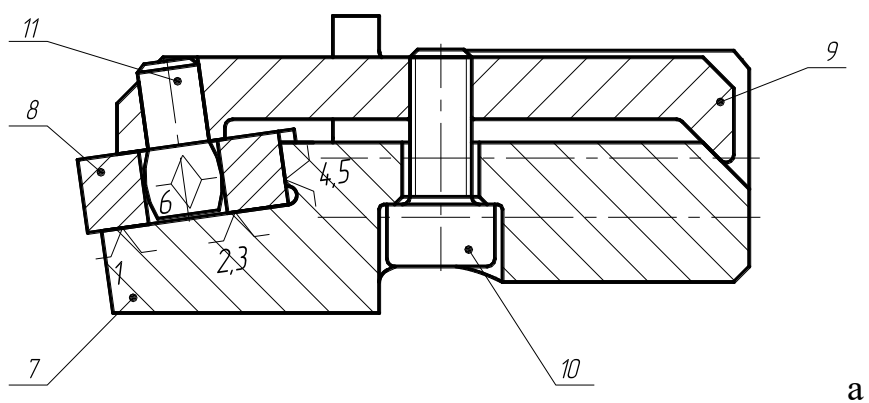
***Н.Н. ПОПОК, Р.С. ХМЕЛЬНИЦКИЙ, Г.И. ГВОЗДЬ, В.С. АНИСИМОВ***  
*Полоцкий государственный университет, Беларусь*

При определении стратегии многоцелевой обработки различных поверхностей деталей требуется систематизация сборных режущих инструментов модульных конструкций, сокращение типоразмеров режущих инструментов на основе унификации входящих в их конструкции модулей, обеспечение сопоставимой надежности и точности различных типов режущих инструментов в инструментальных магазинах станков с ЧПУ.

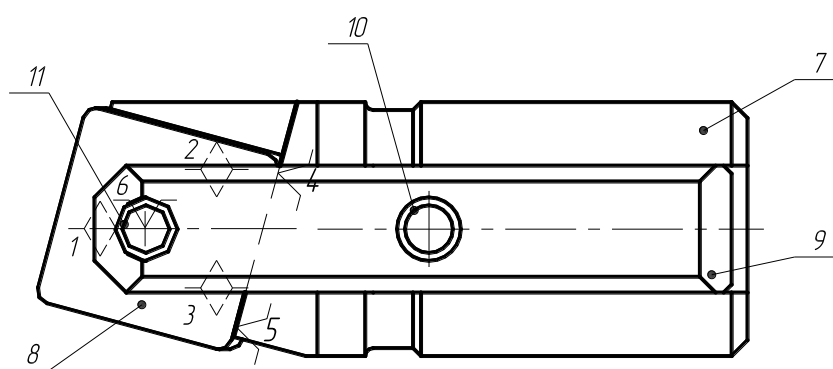
Предлагаемая в данной работе система (гамма) модульных режущих инструментов на основе унифицированного блока резцового (БР) и результаты исследований сопоставимой надежности и точности разных типов режущих инструментов при их одновременной установке и замене в инструментальном магазине станка, разборке, дефектации, восстановлении, сборке и настройке, позволяют сократить вспомогательное время и повысить производительность обработки на одном рабочем месте.

Система блочно-модульных режущих инструментов (БМРИ) обеспечивает построение конструктивных схем различных типов режущих инструментов (РИ) для емких инструментальных магазинов станков с ЧПУ. В базовом варианте БМРИ (рисунок) используется новое техническое решение по способу установки пластины режущей (ПР) и режущему инструменту, отличающиеся выполнением пазов для установки режущей пластины и крепежных элементов открытыми, базированием в открытых пазах как режущей пластины, так и крепежных элементов и использованием крепежного элемента в виде Т-образного прихвата.

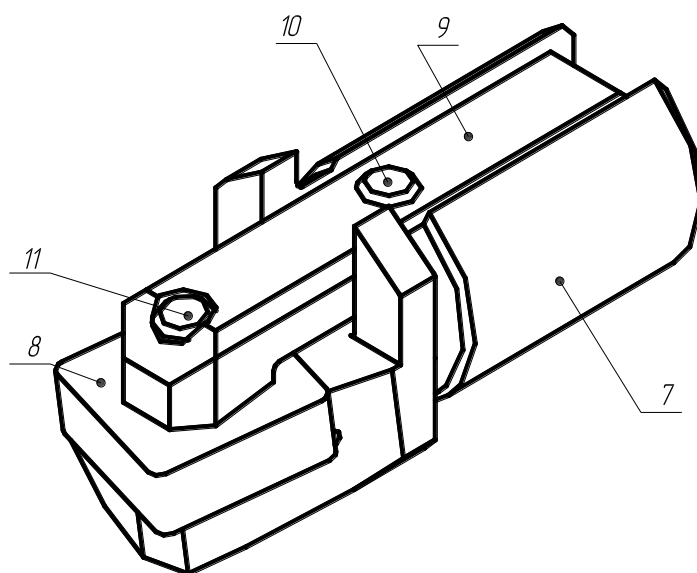
Методика и алгоритм выбора различных типов режущих инструментов для инструментальных магазинов станков учитывают особенности конструкции изделий и технологии их изготовления, а именно: структуру изделия – узлы, соединения, детали, конструктивные элементы поверхности; классификатор деталей типа валов и конструктивных элементов деталей в виде круговых, гранных, зубчато-пазовых, винтовых, отверстий; технологические методы получения изделий и, в частности формообразование поверхностей деталей резанием.



а



б



в

Рисунок. – Резцовый блок: а – главный вид; б – вид сверху; в – 3D модель;  
1, 2, 3 – установочная база, 4 и 5 – направляющая база, 6 – опорная база, 7 – корпус  
режущего инструмента, 8 – сменная режущая пластина, 9 – прихват,  
10 – винт, 11 – штифт



Формализация процесса проектирования комплекта блочно-модульных режущих инструментов включает разработку следующих математических моделей: формирование исходной информации по обрабатываемым поверхностям и конструктивным элементам; схемам обработки резанием; конструктивной схеме режущего инструмента; взаиморасположения блоков и модулей режущего инструмента; оценке вариантов конструкций режущих инструментов по различным критериям, в частности напряженно-деформированного состояния его конструктивных элементов.

Конструкция БМРИ описывается совокупностью (множеством) графа на уровне модулей:

$$P_1 = \bigcup_{i=1}^3 x_i = \bigcup x_1 \bigcup x_2 \bigcup x_3 = \bigcup_{i=1}^{npx1} x_{1i} \bigcup_{i=1}^{npx2} x_{2i} \bigcup_{i=1}^{npx3} x_{3i} \quad (1)$$

и на уровне конструктивных элементов:

$$P_1 = \bigcup_{i=1}^{npx11} x_{11i} \bigcup_{i=1}^{npx12} x_{12i} \dots \bigcup_{i=1}^{npxpx1} x_{npxpx1i} \bigcup_{i=1}^{npx21} x_{21i} \bigcup_{i=1}^{npx22} x_{22i} \dots \bigcup_{i=1}^{npxpx2} x_{npxpx2i} \times \\ \times \bigcup_{i=1}^{npx31} x_{31i} \bigcup_{i=1}^{npx32} x_{32i} \dots \bigcup_{i=1}^{npxpx3} x_{npxpx3i} \quad (2)$$

Ребро  $P_1$  представляет собой подмножество вершин графа  $\Gamma_I \subseteq x$  и одновременно  $P_1 = \{x_1, x_2, x_3\}$ , где  $x_1, x_2, x_3$  – соответственно блок резцовый, модули корпусной и зажимной. В свою очередь  $x_1, x_2, x_3$  являются множествами пластин режущих, пластин опорных, ломателей стружки и других составляющих блока резцового.

Ребро  $P_2$  графа является областью формирования исходных данных по функциональным и технологическим признакам БМРИ, а ребро  $P_3$  – по конструктивным признакам.

Использование унифицированных блоков резцовых и модулей позволяет сократить затраты на конструирование, разработку технологий и изготовление технологической оснастки, т.е. подготовку производства. В процессе эксплуатации БМРИ сокращается время и затраты на его замену в инструментальном магазине станка, разборку, дефектацию, сборку и разборку вне станка. В качестве критериев оценки эффективности эксплуатации БМРИ по сравнению со стандартным РИ принимаются:

- 1) себестоимость, руб. и производительность (трудоемкость  $\tau_{п.з.}$ , Н/час) обработки;
- 2) качество детали – точность IT и шероховатость Ra;

3) надежность РИ – стойкость  $T$ , ремонтпригодность  $\tau_r$ , взаимозаменяемость  $\tau_b$ .

Расчет эффективности БМРИ по сравнению со стандартным РИ при его использовании (полном или частичном) в инструментальных магазинах станков с ЧПУ моделей S45 и Robodrill, время на этапе замены в станке, и на этапе дефектации вне станка показывает следующее. Если в S45 используется 6 БМРИ: 1) резец проходной; 2) резец подрезной; 3) резец расточной; 4) резец резьбовой; 5) зенкер; 6) фреза концевая (торцовая) – итого  $8 \div 9$  БР; в Robodrill – 21 РИ, из них 5 БМРИ: 1) резец расточной; 2) зенкер; 3) фреза концевая; 4) фреза торцовая; 5) фреза дисковая – итого 12 БР, то сопоставимое время работы по стойкости  $T$ , время замены  $\tau_z$  и время дефектации  $\tau_d$  представлено в таблице.

Таблица. – Сопоставление времени работы по стойкости РИ, замены БР и дефектации БМРИ

Наименование РИ	$T$ , мин	$\tau_z$ , мин	$\tau_d$ , мин
Стандартный	60/400	4	30
БМРИ	60/400	2	20

Как видно из таблицы, при эксплуатации БМРИ обеспечивается сокращение времени на замену блоков резцовых в 2 раза и дефектацию его конструктивных модулей в 1,5 раза по сравнению со стандартным РИ. Проведены лабораторные и производственные испытания блочно-модульных режущих инструментов, которые показали их работоспособность в заданном режиме обработки. По производительности и качеству обработки БМРИ не уступают зарубежным аналогам.

**ВЛИЯНИЕ ВРЕМЕНИ ОТЖИГА ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ  
ПОКРЫТИЙ ИЗ ПСЕВДОСПЛАВА «X20H80+АД-1» НА ЕГО  
СТРУКТУРНО-ФАЗОВОЕ СОСТОЯНИЕ И ТВЕРДОСТЬ**

**М.А. БЕЛОЦЕРКОВСКИЙ, В.А. КУКАРЕКО,  
А.Н. ГРИГОРЧИК, Е.В. АСТРАШАБ**

**Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси,  
Минск, Республика Беларусь**

*Проведено исследование структурно-фазового состояния и дюрометрических свойств газотермических покрытий из псевдосплава «X20H80+АД-1» в исходном состоянии, а также после отжига в течение 20, 40, 60 минут при температуре 600°C. Установлено, что отжиг покрытий из «X20H80+АД-1» приводит к увеличению их твердости и микротвердости по сравнению с исходным состоянием за счет выделения в них при отжиге интерметаллидных фаз  $Ni_2Al_3$ ;  $NiAl$ ;  $Al_3Ni$ ;  $Ni_3Al$ .*

**Введение.** Псевдосплавы, получаемые различными методами, находят широкое применение в различных областях промышленности. Применение псевдосплавов (композиционных материалов) позволяет получать изделия с уникальными свойствами, а именно: высокой твердостью, износостойкостью и теплостойкостью, а также повышенным или пониженным значениями коэффициента трения и т.д. Вместе с тем, производство композитов является весьма сложным и трудоемким процессом. Так, например, получение псевдосплавов традиционными методами порошковой металлургии и литья, включает в себя ряд сложных энергозатратных процессов, существенно повышающих стоимость получаемого материала. Таким образом, разработка эффективных и более дешевых методов получения композитов является актуальной задачей. Применение технологии высокоскоростного напыления при изготовлении псевдосплавов позволяет существенно удешевить их производство. Вместе с тем, свойства получаемых методом газотермического напыления псевдосплавов зачастую уступают физико-механическим характеристикам монолитных материалов. Благодаря сочетанию в псевдосплавах различных металлических материалов, появляется возможность дополнительного упрочнения композитов за счет выделения в них интерметаллидных соединений при термической обра-

ботке. В связи с этим, целью работы являлось исследование влияния времени отжига при температуре 600°C напыленных методом высокоскоростной металлизации покрытий из Ni-Cr-Al псевдосплава «X20H80+АД-1» на их структурно-фазовое состояние и дюрометрические свойства.

**Получение образцов и методики исследований.** Напыление газотермического покрытия из псевдосплава «X20H80+АД-1» выполнялось методом высокоскоростной металлизации с использованием установки АДМ-10 на подложку (70×70×5 мм) из стали 20. Диаметр нихромовой и алюминиевой проволок составлял 1,8 мм. Толщина напыленного покрытия составляла 1,2-1,5 мм. Термическая обработка образцов напыленных покрытий проводилась в муфельной печи SNOL 7.2/1100, температура нагрева составляла 600°C, а время выдержки – 20, 40 и 60 минут. Исследование фазового состава напыленных газотермических покрытий осуществляли на дифрактометре ДРОН-3.0 в монохроматизированном кобальтовом ( $\text{CoK}_\alpha$ ) излучении при напряжении 28 кВ и анодном токе 14 мА. Расшифровка рентгенограмм осуществлялось при помощи программного обеспечения Crystallographica Search-Match с картотекой PDF-2. Металлографические исследования проводились на оптическом микроскопе АЛЬТАМИ МЕТ 1МТ. Измерения твердости по Виккерсу проводились на твердомере Du-raScan 20 при нагрузке на индентор  $P = 25$  г и 10 кг.

**Результаты исследований и их обсуждение.** В результате напыления псевдосплава «X20H80+АД-1», методом высокоскоростной металлизации, формируются покрытия, содержащие пониженное количество оксидов. Пористость покрытий не превышает  $\approx 3\text{-}5$  об.% (рисунок 1, а). Твердость и микротвердость псевдосплава «X20H80+АД-1» составляют 160 HV 10 и 250 HV 0,025, соответственно (таблица 1).

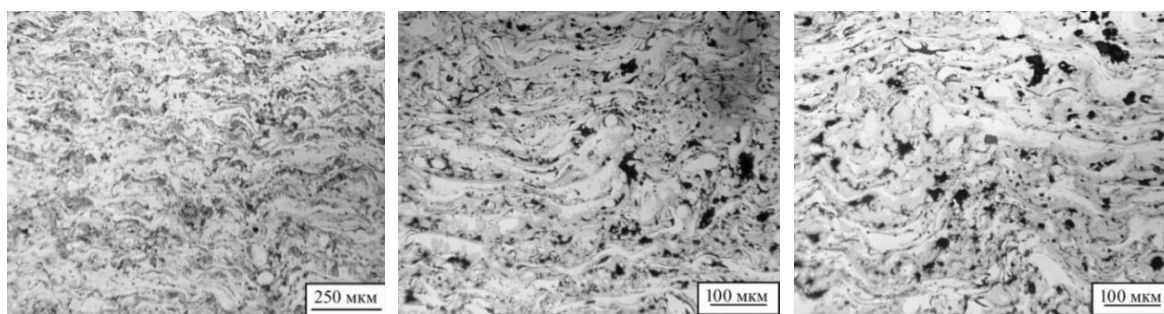


Рисунок 1. – Характерные микроструктуры, напыленного покрытия из псевдосплава «X20H80+АД-1»: а – исходное состояние;  
б – после отжига при 600°C в течение 20 минут;  
в – после отжига при 600°C в течение 60 минут

Отжиг покрытий из «X20H80+АД-1» при 600°С в течение 20-60 минут приводит к существенному увеличению пористости (рисунок 1, б, в). В частности, пористость покрытий после отжига при 600°С в течение 60 минут составляет 17-19 об.%. Увеличение пористости при отжиге покрытий из «X20H80+АД-1» обусловлено реализацией эффектов Френкеля и Киркендалла, заключающихся в том, что при отжиге двух разнородных сваренных материалов происходит диффузия атомов более активного материала (в нашем случае – алюминия) по вакансионному механизму в прослойки сплава X20H80. При этом, вакансии перемещаются в направлении обратном потоку диффундирующих атомов алюминия. В результате диффузионных процессов, происходит смещение границы раздела двух материалов, а также образование диффузионной пористости.

Результаты исследований фазового состава и дюрометрических свойств газотермических покрытий из «X20H80+АД-1» в исходном состоянии и после отжига при 600°С представлены в таблице 1. В исходном состоянии (после напыления) покрытие включает в себя  $\gamma$ -(Ni, Cr, Fe) и Al, а также небольшое количество оксида алюминия  $Al_2O_3$ . Отжиг покрытий при 600°С в течение 20-60 минут обеспечивает выделение в них интерметаллидных фаз  $Ni_2Al_3$ , NiAl,  $Al_3Ni$  (таблица 1). Необходимо отметить, что выдержка при 600°С в течение 20 минут не приводит к полному растворению алюминиевых прослоек в частицах X20H80.

Таблица 1. – Фазовый состав и твердость/микротвердость газотермических покрытий из псевдосплава «X20H80+АД-1» в исходном состоянии и после отжига

Наименование образца	Фазовый состав	HV 0,025	HV 10
X20H80+Al	$\gamma$ -(Ni, Cr, Fe); Al; $Al_2O_3$ (в следах)	250	160
X20H80+Al, отжиг при 600°С, 20 минут	$\gamma$ -(Ni, Cr, Fe); $Ni_2Al_3$ ; NiAl; $Al_3Ni$ ; $Ni_3Al$ ; Al; $Al_2O_3$ (в следах)	480	280
X20H80+Al, отжиг при 600°С, 40 минут	$\gamma$ -(Ni, Cr, Fe); $Ni_2Al_3$ ; NiAl; $Al_3Ni$ ; $Ni_3Al$ ; $Al_2O_3$ (в следах)	490	280
X20H80+Al, отжиг при 600°С, 60 минут	$\gamma$ -(Ni, Cr, Fe); $Ni_2Al_3$ ; NiAl; $Al_3Ni$ ; $Ni_3Al$ ; $Al_2O_3$ (в следах)	505	270

В результате отжига покрытий из псевдосплава «X20H80+АД-1» при 600°С регистрируется существенное повышение их твердости и микротвердости по сравнению с исходным состоянием (таблица 1). В частности, твердость и микротвердость покрытий возрастают до  $\approx 1,7$  и  $\approx 2,0$  раз, соответственно. Существенное повышение дюрометрических свойств по-

крытий из псевдосплава «X20H80+АД-1», подвергнутых отжигу, связано с выделением в них высокопрочных интерметаллидных фаз  $\text{Ni}_2\text{Al}_3$ ,  $\text{NiAl}$ ,  $\text{Al}_3\text{Ni}$  (таблица 1). Некоторое снижение значений твердости при увеличении продолжительности отжига до 60 минут (таблица 1) связано со значительным повышением пористости псевдосплавов.

**Заключение.** Проведено исследование структурно-фазового состояния газотермических покрытий из псевдосплава «X20H80+АД-1» в исходном состоянии и после отжига при  $600^\circ\text{C}$  в течение 20, 40 и 60 минут. Показано, что в исходном состоянии покрытие содержит  $\gamma$ -(Ni, Cr, Fe), Al и  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , а его твердость и микротвердость составляют 160 HV 10 и 250 HV 0,025, соответственно. Установлено, что отжиг покрытий в течение 20-60 минут приводит к увеличению их пористости до  $\approx 19$  об.%, выделению интерметаллидных фаз  $\text{Ni}_2\text{Al}_3$ ,  $\text{NiAl}$ ,  $\text{Al}_3\text{Ni}$ , а также повышению твердости и микротвердости покрытий до  $\approx 1,7$  и  $\approx 2,0$  раз по сравнению с исходным состоянием, соответственно.

## КОРРОЗИОННЫЕ СВОЙСТВА МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ОКРЫТИЙ Ti-Zr-N, СФОРМИРОВАННЫХ ВАКУУМНО- ПЛАЗМЕННЫМИ МЕТОДАМИ

**А.А. ПРЕДКО, О.И. ПОСЫЛКИНА, Н.А. КАНАНОВИЧ**  
*Физико-технический институт НАН Беларуси, Минск*

*В работе показаны результаты коррозионных и рентгеноспектральных исследований многокомпонентных покрытий, полученных вакуумно-плазменным методом.*

Продление срока службы металлических изделий и повышение их устойчивости к процессам коррозионного разрушения является важной задачей во многих областях промышленности [1].

В настоящее время одним из наиболее применяемых методов является защита металлических изделий от коррозии путем осаждения покрытий в вакууме конденсацией плазменных потоков. В частности, электродуговое осаждение с ионной бомбардировкой обеспечивает высокую адгезию и плотность покрытия за счет высоких степеней ионизации потока и энергии конденсирующих ионов, а также контролируемое изменение технологических условий осаждения, определяющих характеристики наносимого покрытия [2].

Целью настоящей работы являлось исследование структуры и защитных свойств многокомпонентных покрытий на основе системы титана и циркония, сформированных методом вакуумно-дугового осаждения в среде азота.

Напыление осуществлялось на установке для нанесений покрытий 01ИН-6-008, оснащенной системой магнитной сепарации плазменного потока. Для осаждения многокомпонентных покрытий на нержавеющую сталь марки 12Х18Н10Т использовались катоды из титана марки ВТ1-0 (ГОСТ 19807-91) и циркония марки Э110 (ТУ 95.166-83). Методом рентгеноспектрального микроанализа посредством микроанализатора JXA-8500F определялось содержание химических элементов в составе покрытий. Фазовый состав покрытий определялся методом рентгеноструктурного анализа на дифрактометре ДРОН-3 в интервале углов 30–120° в фильтрованном  $\text{Cu-K}_\alpha$ -излучении. Коррозионную стойкость полученных покрытий оцени-

вали электрохимическим методом поляризационных кривых на гальваностате-потенциостате Autolab.

Варьируя режимы осаждения, токи дуги титанового и циркониевого катодов, сформированы покрытия Ti-Zr-N с различным соотношением элементов (таблица 1).

Таблица 1. – Технологические режимы осаждения и элементный состав покрытий

Образцы с покрытием	Токи дуги, А		Напряжение смещения, В	Давление азота, Па	Элементный состав, ат.%			$a$ , нм	$D$ , нм
	Ti	Zr			N	Ti	Zr		
TiZrN	100	60	-80	$3 \cdot 10^{-2}$	46,80	49,30	3,91	12,8	0,4274
TiZrN	80	80			51,53	21,24	27,23	10,5	0,4351
TiZrN	45	100			53,37	5,92	40,70	7,5	0,4423

Для покрытий системы (Ti,Zr)N вне зависимости от концентрации Zr основной составляющей является твердый раствор (Ti,Zr)N на основе кубической решетки структурного типа NaCl.

Параметр решетки покрытий TiZrN увеличивается с 0,4274 до 0,4423 нм при повышении концентрации Zr, поскольку атомный радиус циркония (0,160 нм) превышает атомный радиус титана (0,146 нм) и происходит образование твердого раствора  $Ti_{1-x}Zr_xN$  на базе решетки TiN (параметр решетки 0,4242).

Покрытия Ti-Zr-N характеризуются плотной, бездефектной структурой. Отсутствие дефектов на поверхности и в объеме покрытий способствует уменьшению пористости, что является немаловажным фактором для улучшения износ- и коррозионных свойств покрытий.

Для определения коррозионной стойкости проводились электрохимические исследования в 3%-ном водном растворе NaCl. Измерение стационарных электродных потенциалов системы «покрытие-основа» показало, что слои Ti-Zr-N, сформированные методом вакуумно-дугового осаждения, обладают защитным действием по отношению к стали 12X18H10T. Установлено, что повышение атомной концентрации циркония в вакуумно-дуговых покрытиях приводит к сдвигу в положительную сторону стационарного электродного потенциала и снижению плотности тока коррозии (таблица 2).



Таблица 2 – Рассчитанные значения потенциала и скорости коррозии покрытий Ti-Al-N

Материал	Ест, В	Е <sub>корр</sub> , В	i <sub>корр</sub> , ·10 <sup>-8</sup> , А
Сталь - покрытие TiZrN с 3,91 ат. % Zr	-,133	-0,169	1,11
Сталь - покрытие TiZrN с 27,3% ат. % Zr	-,041	-0,085	1,03
Сталь - покрытие TiZrN с --40,70% ат. % Zr	-,028	-0,079	0,93
Сталь 12Х18Н10Т	-,195	-0,21	25,3

**Выводы.** Напыление многокомпонентных покрытий Ti-Zr-N методом вакуумно-дугового осаждения позволило существенно увеличить коррозионную стойкость стали 12Х18Н10Т, о чем свидетельствуют низкие токи коррозии многокомпонентного покрытия Ti-Zr-N и сдвиг стационарных электродных потенциалов в более положительную сторону. Повышенная коррозионная стойкость обусловлена формированием плотной и однородной микроструктуры покрытий, отсутствием в них дефектов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Лайнер В. И., Защитные покрытия металлов / В. И. Лайнер. – Москва: Металлургия, 1974. – 559 с.
2. Табаков В. П., Формирование износостойких ионно-плазменных покрытий режущего инструмента / В. П. Табаков. – Москва: Машиностроение, 2008. – 16 с.

UDK 621.793.7: 620.178.53: 539.4:539.67

## **ПОВЫШЕНИЕ ПРОЧНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ НАНЕСЕНИЕМ НА ИХ ПОВЕРХНОСТЬ ПОКРЫТИЙ**

**А.В. ДУДАН**

*<sup>1</sup>Полоцкий государственный университет, Новополоцк, Беларусь*

**Е.К. СОЛОВЫХ**

*Центральноукраинский национальный технический университет,*

*Кропивницкий, Украина*

**М.Ф. КОВАЛЕВ, М. ГОЛОВАЩУК**

*Национальный транспортный университет, Киев, Украина*

**В.Н. КУЛЫЖСКИЙ**

*Институт проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины,*

*Киев, Украина*

*В работе показана целесообразность и отмечены перспективы использования различных методов упрочнения и нанесения покрытий для повышения прочности несущих деталей, защиты их от коррозии и износа. Показано, что разработанные в настоящее время технологические методы упрочнения позволяют повысить прочность и, в частности, пределы выносливости деталей более чем в 2 раза, а сроки службы за счет этого - в десятки раз. Физическая природа эффекта упрочнения, вызванного технологическими приемами обработки поверхности изделия, связана с образованием в поверхностных слоях сжимающих напряжений, приводящих к переходу очага зарождения усталостной трещины от рабочих напряжений с поверхности в глубь детали ниже слоя с сжимающими напряжениями. Эффект упрочнения зависит как от механических свойств материала в сечении, так и от результирующей положения эпюр остаточных напряжений (вызванных упрочнением) и рабочих напряжений.*

В процессе эксплуатации большинство деталей любых машин подвергается силовым воздействиям, вызывающим крайне неоднородное напряженное состояние. При этом во всех случаях максимальные напряжения, обусловленные главным образом изгибом и кручением или их совместным действием, возникают в наружных слоях материала несущих деталей, где и появляются первые трещины, приводящие к разрушению. Следует учесть и сильное влияние на разупрочнение поверхностных слоев

внешней среды, приводящей во многих случаях к коррозии, которая понижает прочность, особенно усталостную. На несущую способность деталей, подверженных в процессе эксплуатации трению и износу, влияют и поврежденные поверхностные слои материала.

Поэтому большое практическое значение в машиностроении приобретают различные методы упрочнения поверхности деталей машин, целью которых является как повышение прочности несущих деталей и защиты их от коррозии, так и снижение износа деталей, подверженных при контактном взаимодействии трению и износу.

В зависимости от типов деталей и материалов, из которых они изготовлены, условий их эксплуатации применяют различные виды и технологии упрочнения поверхности. Отметим следующие виды упрочнения поверхности элементов конструкций:

- химико-термическая обработка (ХТО), в том числе газовая цементация, газовое азотирование, жидкостное борирование, твердофазное борирование;
- газотермическое напыление (ГТН), в частности газопламенное (ГПН), электродуговое (ЭДН), плазменное и детонационное;
- гальванические покрытия;
- электроискровое легирование (ЭИЛ) и легирование лазерное;
- электронно-лучевое упрочнение;
- химическое осаждение из газовой фазы;
- вакуумное осаждение, в том числе химико-технологическая обработка в тлеющем разряде;
- ионная имплантация;
- парогазовая конденсация и др.

Значительное распространение получили методы повышения прочности элементов конструкций и деталей машин, подверженных действию повторно-переменных нагрузок. К их числу следует отнести упрочнение поверхности путем наклепа, обкаткой роликами или обдувкой металлической дробью, а также поверхностной закалкой с нагревом током высокой частоты (ТВЧ), цементацией, цианированием и др.

Рассмотрим характерные виды упрочнения элементов конструкций и деталей машин путем нанесения на их поверхность специальных металлических слоев. Среди методов упрочнения поверхности изделий важное место занимают наплавка и напыление как средства поверхностного упрочнения деталей машин при изготовлении и восстановлении. Указанные типы покрытий обеспечивают значительное повышение работоспособности и

долговечности машин и механизмов за счет увеличения износостойкости, коррозионной стойкости и других эксплуатационных свойств деталей в зависимости от их назначения.

Для упрочнения деталей металлургического оборудования и сельскохозяйственном машиностроении широкое распространение получила наплавка износостойкими материалами. Заслуживает внимания плазменное напыление гильз цилиндров дизельных двигателей с целью их защиты от кавитации. При этом имеется возможность установить пороговое значение прочности сцепления покрытия, при котором происходит смена механизма разрушения композиции. Исследования показали, что максимальный эффект по защите гильз цилиндра двигателя от кавитации удастся достичь за счет увеличения прочности материала покрытия, а также адгезионной прочности покрытия с основой, превышающей критическое пороговое значение. При этом удастся сохранить ресурс работы изделия при снижении в два раза толщины наплавленного защитного слоя.

Наряду с упрочнением покрытиями путем напыления и наплавки, используется метод нанесения покрытий дискретной структуры. Покрытие представляет собой отдельные островки — «точки», получаемые с помощью специальных металлических электродов. При этом минимальный износ достигается, когда островки занимают 60 % поверхности упрочняемой детали. Указанные островки имеют высокую твердость по сравнению с твердостью основного металла. Такое упрочнение эффективно для снижения износа трущихся поверхностей деталей машин и трущихся о грунт поверхностей элементов землеобрабатывающих машин.

Особого внимания заслуживают покрытия, применяемые в газотурбостроении для упрочнения и увеличения долговечности рабочих лопаток. В этом случае покрытие служит не столько для упрочнения лопатки, сколько для защиты от коррозии, влияющей на долговечность лопатки, а также для тепловой защиты материала лопатки от перегрева и повышения температуры газового потока на входе, а, следовательно, и повышения коэффициента полезного действия (КПД) газовой турбины. \

Цель покрытия - повысить весь комплекс технико-экономических показателей газовой турбины, что может быть достигнуто повышением температуры на входе газовой турбины. Для этого необходимо повысить жаростойкость применяемых для изготовления турбинных лопаток материалов путем нанесения на готовое изделие защитных покрытий. Многочисленные исследования показали, что эффективным методом получения такого покрытия является электронно-лучевое испарение и конденсация

металла на поверхности в условиях вакуума. При использовании упрочняющих и теплозащитных покрытий (ТЗП) применительно к турбинным лопаткам оправдали себя многослойные покрытия. Позволяет создавать сложные композиционные многослойные покрытия электронно-лучевая технология, которая является одной из наиболее гибких в управлении.

Для обеспечения оптимальной несущей способности изделия с покрытием подбор материала слоев по физико-механическим свойствам и чередование слоев осуществляются так, чтобы не было резкой разницы в физико-механических свойствах в соседних слоях и тем самым можно было бы свести до минимума начальные остаточные напряжения, которые могут возникать при повышении температуры. Такой подход, используемый, в частности, при применении покрытий из тугоплавких материалов на основе ниобия и молибдена для несущих элементов реактивных двигателей, эксплуатируемых в условиях высоких температур, основным материалом которых является сплав на основе ниобия, позволил повысить сопротивление ползучести на 10-20 %, долговечность увеличить в 3 раза, а при теплосменах - более чем в 2 раза. В случае применения в качестве основного материала сплава на основе молибдена сопротивление ползучести при теплосменах возрастает на 35—60 %, жаропрочность - в 4 раза, а долговечность - в 4-6 раз. Использование для нанесения защитных покрытий электронно-лучевой технологии позволило повысить долговечность композиции «жаропрочный сплав – ТЗП» в 1,5-1,6 раза при испытаниях на термоциклическую ползучесть и в 1,6-2,1 раза при испытаниях на изотермическую ползучесть при снижении скорости ползучести на 40-50 %.

Разработанные в настоящее время технологические методы упрочнения позволяют повысить прочность и, в частности, пределы выносливости деталей более чем в 2 раза, а сроки службы за счет этого - в десятки раз. Физическая природа эффекта упрочнения, вызванного технологическими приемами обработки поверхности изделия, связана с образованием в поверхностных слоях сжимающих напряжений, приводящих к переходу очага зарождения усталостной трещины от рабочих напряжений с поверхности в глубь детали ниже слоя с сжимающими напряжениями. Эффект упрочнения зависит как от механических свойств материала в сечении, так и от результирующей положения эпюр остаточных напряжений (вызванных упрочнением) и рабочих напряжений.

**ВЛИЯНИЕ ИМПУЛЬСНОГО ИОННОГО АЗОТИРОВАНИЯ  
НА СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ  
ЭЛЕКТРОДУГОВЫМ НАПЫЛЕНИЕМ**

**А.В. РУТКОВСКИЙ, А.П. ЗИНЬКОВСКИЙ,  
Д.О. ПШЕНИЧКИН, Л.А. ЛОПАТА**

*Институт проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины,  
Киев, Украина*

**М.С. АГЕЕВ**

*Херсонская государственная морская академия, Херсон, Украина*

**А.В. ДУДАН**

*Полоцкий государственный университет, Новополоцк, Беларусь*

*В работе рассмотрены результаты экспериментальных исследований по изучению влияния импульсного ионного азотирования на свойства покрытий, полученных электродуговым напылением. Показано, что использование импульсного ионного азотирования для обработки деталей машин с напыленными покрытиями существенно повышает их физико-механические свойства, такие как микротвердость, износостойкость, пористость и адгезионная прочность.*

Одним из эффективных технологических средств повышения несущей способности и коррозионной стойкости деталей машин является нанесение упрочняющих защитных покрытий. Из многообразия существующих способов, наиболее распространенным является газотермическое напыление. При этом самым дешевым и простым методом его реализации является электродуговое напыление покрытий (ЭДН-покрытие).

Как следует из анализа известных результатов исследований [1, 2], существенное улучшение свойств покрытий, полученных напылением, возможно путем последующей лазерной, ультразвуковой, электроискровой, электронно-лучевой или другой обработки машиностроительных конструкций. Такая технологическая операция способствует повышению физико-механических свойств рассматриваемых покрытий.

Целью данной работы является исследование влияния импульсного ионного азотирования, как экологически безопасной и экономически эффективной технологии диффузионного легирования и формирования высо-

копрочных поверхностных слоев деталей машин, на физико-механические свойства покрытий, полученных электродуговым напылением.

Для исследований использовались круглые образцы диаметром 20 мм из стали 45, на которые наносились ЭДН-покрытия из сталей 40X13 и 12X18Н10Т, относящиеся к сталям мартенситного и аустенитного классов соответственно. В дальнейшем производилось их импульсное ионное азотирование (ИИА) на установке «ВИПА-1», разработанной в Институте проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины [3].

По результатам испытаний определялись такие характеристики образцов с ЭДН-покрытиями в исходном состоянии и после обработки импульсным ионным азотированием: микротвердость, износостойкость, пористость и адгезионная прочность. Проведем их анализ.

Как видно из приведенных в табл. 1 данных, микротвердость образцов после обработки ИИА независимо от ее температуры составляет от 5,8 до 15,9 ГПа, в то время как в их исходном состоянии - 4,8...5,6 ГПа. Кроме того, при определенной температуре азотирования микротвердость достигает максимального значения.

Таблица 1. – Влияние температуры ИИА на микротвердость ЭДН – покрытий

Материал покрытия	Значения микротвердости (ГПа) при температуре азотирования $T$ ( $^{\circ}\text{C}$ ), равной:						
	600	620	650	670	700	720	770
Сталь 40X13	8,6	11,3	12,9	14,0	15,9	12,7	11,3
Сталь 12X18Н10Т	5,8	6,2	8,0	8,9	11,1	10,8	10,5

Влияние ИИА на микротвердость ЭДН-покрытий можно объяснить присутствием в модифицированных азотом поверхностных слоях покрытий из рассматриваемых сталей нитридов  $\varepsilon$ -(Fe,Cr) $_3$ N и  $\gamma'$ -Fe $_4$ N. При  $T = 720$  и  $770^{\circ}\text{C}$  микротвердость поверхностного слоя начинает снижаться до 10500–12700 МПа (табл. 1) вследствие уменьшения содержания  $\varepsilon$ -нитридов и образование нитрида CrN в азотированных слоях. Таким образом, изменяя температуру азотирования можно управлять микротвердостью покрытия.

Одновременно, по мере увеличения температуры азотирования, возрастает его глубина  $\delta_{сл}$ , что наглядно видно из данных, приведенных на рис. 1. При этом следует также отметить, что чем выше температура азотирования, тем меньший промежуток времени  $\Delta t$  необходим для начала процесса насыщения поверхности азотом. Кроме того, изменяя температуру азотирования, можно управлять глубиной диффузионного слоя и твердостью покрытия.

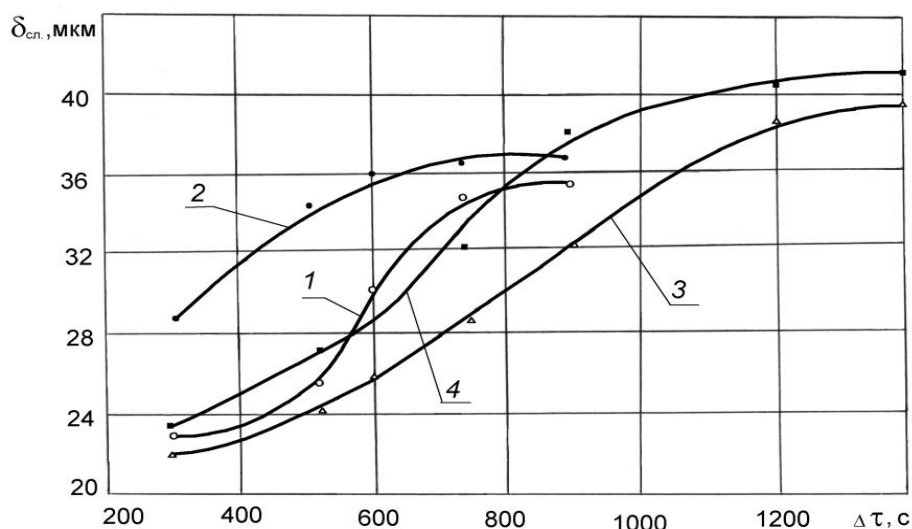


Рисунок 1. – Зависимость глубины азотирования от времени между нагревом до заданной его температуры и началом процесса насыщения поверхностного слоя азотом для образцов с покрытием из сталей 40X13 (1,2) и 12X18H10T (3,4):  
1 –  $T = 680^{\circ}\text{C}$ ; 2 –  $710^{\circ}\text{C}$ ; 3 –  $650^{\circ}\text{C}$ ; 4 –  $680^{\circ}\text{C}$

Увеличение микротвердости ЭДН-покрытий после обработки ИИА обеспечивает повышение их износостойкости, определяемой интенсивностью весового износа поверхностного слоя  $I_h$ . Так, например, для покрытий из стали 40X13 после обработки ИИА интенсивность износа снижается до  $I_h = 5-6$  мг/км, в то время для образцов в исходном состоянии она равнялась 19 мг/км.

На повышение износостойкости ЭДН-покрытий, как и увеличение их микротвердости (табл. 1), влияет температура азотирования, о чем наглядно свидетельствуют данные, приведенные на рис. 2.

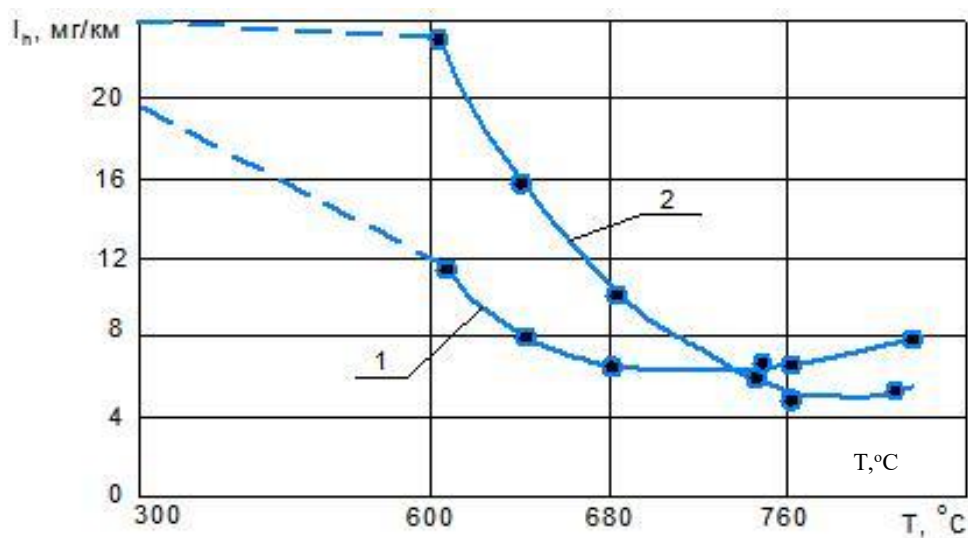


Рисунок 2. – Зависимость интенсивности износа ЭДН-покрытий из сталей 40X13 (1) и 12X18H10T (2) от температуры азотирования



Одной из важнейших характеристик, определяющих качество ЭДН-покрытий, является их пористость. На основании анализа микроструктуры рассматриваемых покрытий после азотирования установлено, что при пористости, составляющей более 10% их площади, имеют место участки вспучивания, которые после отслаивания покрытия превращаются в каверны. Результаты проведенных исследований показывают, что при пористости покрытий менее 10 % их площади эффект вспучивания не возникает.

Очевидно, что при возрастании пористости покрытий снижается их адгезионная прочность. Для ее повышения создание ЭДН-покрытий с использованием стальных проволок осуществлялось продуктами сгорания пропана и воздуха. Такая технология позволяет получать покрытия пористостью менее 10 %, вследствие чего адгезионная прочность возрастает до 100 МПа. Использование в этом случае обработки ИИА обеспечивает еще более существенное повышение адгезионной прочности ЭДН-покрытий.

**Выводы.** Была произведена оценка возможности повышения качества ЭДН-покрытий из сталей мартенситного и аустенитного классов путем использования импульсного ионного азотирования. В результате экспериментальных исследований установлено, что она позволяет существенно улучшить физико-механические свойства ЭДН-покрытий, а именно: микротвердость, износостойкость и прочность сцепления при их пористостью не более 10 %. При этом эффективным средством управления этим процессом является температура азотирования.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Пантелеенко Ф.И. и др. Методика разработки комбинированных упрочняющих технологических процессов. *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2010. № 10. С. 36-42.
2. Агеев М.С., Дудан А.В., Ворона Т.В., Ляшенко Б.А. Применение гибридных технологий для реновации и повышения ресурса судовых машин и механизмов. *Вестник Брестского государственного технического университета. Машиностроение*. 2015. №4(94). С. 18-22.
3. Харченко В.В., Ляшенко Б.А., Куриат Р.И., Исаханов Г.В. Термоциклическое азотирование как синтез разработок НАН Украины. *Современные проблемы производства и ремонта в промышленности и на транспорте*: матер. 12-го Междунар. науч.-техн. семинара (Свялява, 20-24 февраля 2012). Киев : АТМ Украины, 2012. С.287-290.

## ПРОЧНОСТНОЙ АСПЕКТ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ МАТЕРИАЛА ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ

**А.В. ДУДАН**

*Полоцкий государственный университет, Новополоцк, Беларусь*

**О.А. МИКОСЯНЧИК, Р.Г. МНАЦАКАНОВ, О.В. РАДЬКО**

*Национальный авиационный университет, Киев, Украина*

**Т.И. ИВЧЕНКО**

*Херсонская государственная морская академия, Херсон, Украина*

*В работе показано, что прочность поверхностных слоев материала элементов конструкций и их сопротивление разрушению в процессе эксплуатации решающе влияет на долговечность и надежность изделия в целом. Проблема прочности и разрушения приповерхностных слоев материала имеет ряд особенностей из-за физико-химических процессов, которые имеют место при взаимодействии контактирующих тел. В работе рассмотрены характерные особенности прочностного аспекта поверхностного слоя материала, которыми являются неоднородность физико-механических свойств и локальность силового взаимодействия контактирующих тел.*

Важнейшим вопросом прочности современного машиностроения, безусловно, является прочность поверхностных слоев материала элементов конструкции и их сопротивление разрушению в процессе эксплуатации. Прочность поверхностного слоя материала во многих случаях решающе влияет на долговечность и надежность не только отдельных деталей и узлов, но и изделия в целом.

Известно, что разрушение любой детали начинается с поверхности. Проблема прочности и разрушения приповерхностных слоев материала из-за физико-химических процессов, которые имеют место при взаимодействии контактирующих пар, имеет ряд особенностей.

Характерными особенностями рассмотрения прочностного аспекта поверхностного слоя материала являются неоднородность физико-механических свойств и локальность силового взаимодействия контактирующих тел. Характерная особенность такого взаимодействия — отсутствие сплошного контакта, который имеет место по отдельным площадкам

в виде малых пятен, суммарная площадь которых составляет малую часть номинальной площади, что является причиной высоких давлений в местах контакта. Учитывая большое отличие структуры и напряженного состояния поверхностного слоя металла от основного металла, из которого изготовлена деталь, представляется существенным рассмотреть более детально структуру приповерхностного слоя, начиная от поверхности до основного материала детали.

Схему поверхностного слоя можно представить четырьмя слоями:

- приповерхностная зона толщиной порядка 1—10 мм, содержащая абсорбированные из окружающей среды молекулы и атомы органических и неорганических веществ;
- вторая зона (толщиной порядка - 3 мкм), представляющая собой продукт химического взаимодействия металла с окружающей средой (чаще всего соединения с кислородом);
- третья зона (толщиной в несколько межатомных расстояний), имеющая кристаллическую и электронную структуру и отличается от основного металла;
- четвертая зона (толщиной порядка 0,01—0,1 мм) определяется микроструктурой трущихся материалов.

При обеспечении прочности поверхностного слоя важно иметь представление о структуре и взаимосвязи поверхностного слоя с физико-химическими процессами, сопутствующими реальным условиям эксплуатации. Картину такого рода взаимодействия можно представить следующим образом: в субмикроскопических масштабах механизм деформирования поверхностного слоя отличен от механизма деформирования лежащих ниже слоев, благодаря чему его фазовый и химический состав изменяется под влиянием физико-химических процессов, обусловленных технологией изготовления и условиями эксплуатации.

Поверхностный слой материала элементов конструкции всегда существенно влияет на ее прочность и долговечность. Рассмотрение структуры поверхностного слоя материала элементов конструкции позволяет проанализировать процесс его деформирования и разрушения во времени. Схему процесса деформирования и разрушения поверхностного слоя материала можно представить следующим образом:

- первый, выходящий на поверхность слой рассматривают как некоторое «третье тело», на поверхности которого имеют место механический, масштабный и поверхностные эффекты. Механический эффект можно определить тем, что из-за микроскопических очагов деформаций скорости

деформаций в поверхностных слоях чрезвычайно велики —  $103^{-10}$  е в секунду. Поэтому микрообъемы в поверхностном слое с высокими деформациями и их скоростями существенно отличаются от основы как физическим состоянием, так и микромеханизмом деформирования и разрушения. Под масштабным эффектом понимают соизмеримость масштабов приложения внешних сил с масштабами параметров неоднородности материалов. Поверхностный эффект вызван тем, что субмикроскопические очаги деформации находятся в поле действия неоднородности, обусловленной состоянием поверхности и окружающей средой, определяющими микромеханизм их деформирования. Субмикроскопический масштаб этого процесса обуславливает разрушение поверхностного слоя;

– второй слой, подповерхностный, по толщине значительно превосходит первый поверхностный и имеет микроскопические размеры. Нагруженность зависит от его механических свойств и распределения внешних нагрузок. Масштабный эффект в нем проявляется значительно меньше, а нагруженность значительно ниже, чем в первом слое. При этом изменения состояния второго слоя соизмеримы со временем эксплуатации изделия.

Следует иметь в виду, что процессы поверхностного и подповерхностного разрушения находятся в тесной взаимосвязи, а потому их нельзя рассматривать изолированно друг от друга несмотря на то, что происходят они на разных уровнях. Учитывая значительное влияние материалов на протекающий процесс, в зоне контакта, по-видимому, правильнее говорить не об свойствах материала, а об их совместимости. Разрушение подповерхностного слоя происходит в результате накопления дефектов. Процесс разрушения во времени носит ярко выраженный циклический характер, механизм разрушения — усталостный характер.

Следует заметить, что проблема разрушения в условиях упругопластического деформирования практически, не изучена, главным образом из-за отсутствия моделей, описывающих эволюцию физико-механических свойств подповерхностных слоев, обусловленную физико-химическими процессами. При разработке эффективных моделей необходимо более глубоко изучить процесс пластической деформации в поверхностном слое тел, использовать феноменологические зависимости, выраженные в термических напряжениях и деформациях, и энергетические методы, основанные на использовании термодинамических подходов, в частности на термодинамике необратимых процессов открытых систем.

UDK 621.793.7: 620.178.53: 539.4:539.67

## ОБ ОСНОВНЫХ КОНЦЕПЦИЯХ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ УПРОЧНЯЮЩИХ ПОКРЫТИЙ

**А.В. ДУДАН**

*Полоцкий государственный университет, Новополоцк, Беларусь*

**В.И. КАЛИНИЧЕНКО**

*Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический университет им. Игоря Сикорского», Киев, Украина*

**А.В. ЛОПАТА, И.В. СМЕРНОВ, В.Я. НИКОЛАЙЧУК**

*Винницкий национальный аграрный университет, Винница, Украина*

*В работе рассмотрены основные концепции решения проблемы упрочняющих покрытий и предложен двухсторонний подход к изучению композиции основа - покрытие и прогнозированию ее свойств, т. е. установлению зависимости механических свойств композиции от конструктивно-технологических факторов ее создания путем построения физических моделей разрушения, отражающих физическую суть изучаемых явлений. Показано, что нанесение покрытий вносит целый ряд сложностей, что связано с наличием адгезионного контакта на границе раздела разнородных материалов и неаддитивности ее свойств в зависимости от свойств отдельных составляющих композиции основа – покрытие.*

Нанесение покрытий на упрочняемую и защищаемую поверхность вносит целый ряд сложностей и неопределенностей при проектировании деталей с покрытиями и прогнозировании их свойств. Это связано с особенностями композиции основа — покрытие, прежде всего с наличием адгезионного контакта на границе раздела разнородных материалов и неаддитивности ее свойств в зависимости от свойств отдельных составляющих композиции. Отличительная особенность композиции — различие теплофизических и механических свойств материала основы и отдельных слоев покрытия. Это - причина того, что в таких композициях при любых схемах термического или механического нагружения имеются остаточные напряжения, которые неравномерно распределены по объему материала.

Первой важной особенностью композиции основа - покрытие является неоднородность напряженно-деформированного состояния (НДС) композиции, которая может сглаживаться или усугубляться в процессе длительного высокотемпературного нагружения, что связано с развитием

диффузионных процессов. Интенсивность этих процессов определяется различием химического состава покрытия и основы. Эти процессы могут стать причиной разрушения или отслоения покрытия.

Второй важной особенностью композиции основа - покрытие является проявление при определенных условиях физических эффектов, связанных с созданием энергетических барьеров на пути движения дислокаций в основе и выходе их на поверхность. Эти эффекты были описаны Р. Роско еще в начале XX в. и названы его именем. Нанесение тонких твердых пленок с высоким модулем упругости затрудняет выход дислокаций на поверхность основного материала и их перемещение в поверхностных слоях основы, а также блокирует поверхностные источники дислокаций. Это приводит к многократному снижению скорости установившейся ползучести, повышению пределов текучести и прочности.

Третьей особенностью исследуемых композиций является существенная зависимость структуры и свойств покрытия, диффузионных процессов на границе раздела системы основа - покрытие от целого ряда технологических факторов, таких, как температуры подложки на различных этапах нанесения покрытия, параметров механической обработки (МО) поверхности, ее состояние после шлифовки и некоторых других. Наиболее развиты подходы к изучению деформирования и разрушения твердого тела с однослойным покрытием при его нагружении в области упругих деформаций. Анализ НДС позволяет установить связь характера разрушения композиции основа - покрытие с физико-механическими характеристиками покрытия и основы, а также с соотношением их толщин.

Практически все разработанные критерии предельного состояния композиции основа - покрытие не предусматривают учета всех перечисленных выше факторов, определяющих несущую способность и долговечность композиции. Пока не удалось установить количественную связь между характером развития диффузионных процессов на границе раздела основа - покрытие, интенсивностью генерирования и перемещения дислокаций в твердом теле, структурными особенностями покрытия и прочностными параметрами композиции основа - покрытие.

Таким образом, количественный учет всех факторов и параметров диффузионных процессов, физических эффектов типа эффекта Роско, статистического аспекта разрушения, структурных особенностей композиции основа - покрытие и отдельных ее составляющих, закономерностей трещинообразования в покрытии, неоднородности НДС композиции, как при

изотермическом, так и при термоциклическом нагружениях в рамках единого подхода пока невозможен.

Для изучения столь сложных систем и установления количественной связи исследуемых независимых переменных с одной или несколькими зависимыми в последнее время все шире используются методы математического планирования эксперимента. Это позволяет решить задачу выбора оптимальных конструктивно-технологических факторов нанесения покрытий по параметрам прочности с учетом рассчитанных на основе экспериментальных данных математических моделей, устанавливающих связь указанных факторов и прочностных параметров. Этот подход позволяет наметить дальнейший план исследований, уточнив важные факторы, а, что не менее полезно, отсеять те, которые не влияют на эксплуатационные характеристики детали с покрытием.

Ограниченность такого подхода заключается, прежде всего, в сложности прогнозирования свойств композиции основа - покрытие при выходе за пределы области планирования эксперимента. Это становится возможным в случае обобщения установленных количественных соотношений между конструкционно-технологическими факторами нанесения покрытия и прочностными характеристиками рассматриваемой композиции, прежде всего на основе анализа ее НДС. Сопоставление полученных экспериментальных данных позволяет установить принципы снижения или увеличения несущей способности композиции основа — покрытие и внести такие изменения в схему конструкции покрытия, благодаря которым удастся достичь однородного распределения напряжений по сечению детали и снизить растягивающие напряжения в покрытии.

В случае изучения покрытий, материал которых отличается не только физико-механическими характеристиками, но и типом кристаллической решетки, важное значение приобретает исследование процессов трещинообразования и разрушения покрытия и их влияния на закономерности деформирования и разрушения композиции основа - покрытие в целом. Это достигается наблюдением за состоянием поверхности образца с покрытием непосредственно в процессе его испытаний. В последующем важную информацию позволяет получить использование металлографических и фракто - графических методов исследований. Электронная фрактография - один из нелегких, а часто и единственный метод, позволяющий ответить на вопрос о причинах и механизмах потери устойчивости материала покрытия. Количественная стереофрактография дает возможность не только составить более достоверное суждение о процессах разрушения на каче-

ственном уровне, но и получить уникальные количественные данные локальных разрушений.

Таким образом, перспективным представляется двухсторонний подход к изучению композиции основа — покрытие и прогнозированию ее свойств, т. е. установление зависимости механических свойств композиции от конструктивно-технологических факторов ее создания путем построения физических моделей разрушения, отражающих физическую суть изучаемых явлений.



## ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ СВАРКА ДЕТАЛЕЙ ТИПА «ВТУЛКА» С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ОБРАЗОВАНИЯ ДЕФЕКТОВ В СВАРНОМ ШВЕ

**А.А. БУРИН, С.В. ЮРЕВИЧ, И.Л. ПОБОЛЬ**

**Физико-технический институт НАН Беларуси, Минск, Беларусь**

*Исследована геометрия сварных швов на деталях типа «втулка» из стали 35 в зависимости от параметров электронно-лучевой сварки (ЭЛС). Определены режимы сварки, позволяющие получить бездефектные швы с глубиной проплавления 7 мм. Изучены структура и микротвердость металла полученных сварных соединений.*

Электронно-лучевая сварка позволяет эффективно использовать различные методы предотвращения образования дефектов и получать сварные соединения одно- и разнородных материалов. Электронный луч оказывает локализованное тепловое воздействие (диаметр пятна нагрева может составлять менее 0,1 мм), что позволяет получать сварные швы с соотношением ширины шва к глубине до 1:20 и более. Такая геометрия сварных швов способствует уменьшению размеров зоны термического влияния, снижению неблагоприятных сварочных напряжений и деформаций, что позволяет избежать образования дефектов сварных швов ряда ограниченно и трудносвариваемых материалов. Примером являются конструкционные стали, которые обладают удовлетворительными механическими свойствами, однако при сварке склонны к образованию в металле сварных швов и зоне термического влияния хрупких закалочных структур, холодных и горячих трещин.

**Материалы и оборудование.** В качестве образцов использовались заготовки деталей «втулка» из стали 35 (рисунок 1). Сварка выполнялась на установке электронно-лучевой обработки ФТИ НАН Беларуси, созданной на базе энергоблока ЭЛА-15, по режимам обработки, представленным в таблице. Перед ЭЛС образца 5 проводили его нагрев расфокусированным лучом.

**Результаты исследований.** На образцах, сваренных без предварительного подогрева (рисунок 2, а), присутствует трещины различного размера, подогрев позволяет избежать таких дефектов (рисунок 2, б).

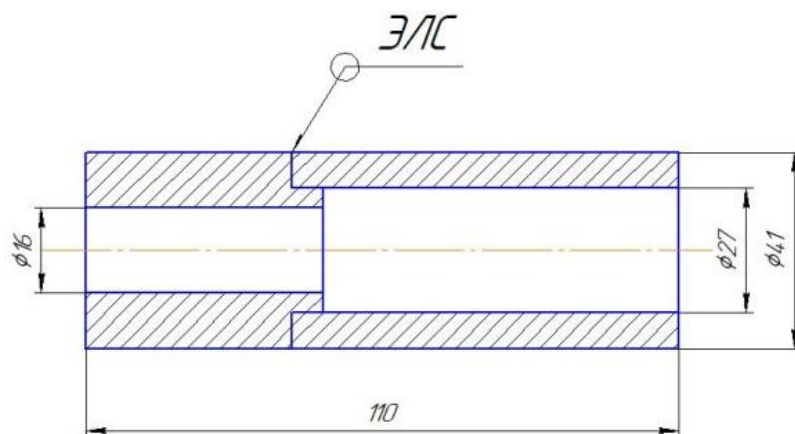
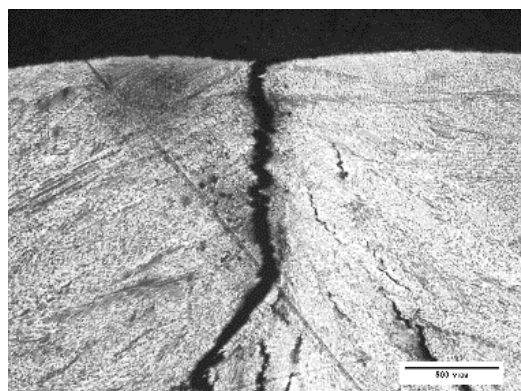


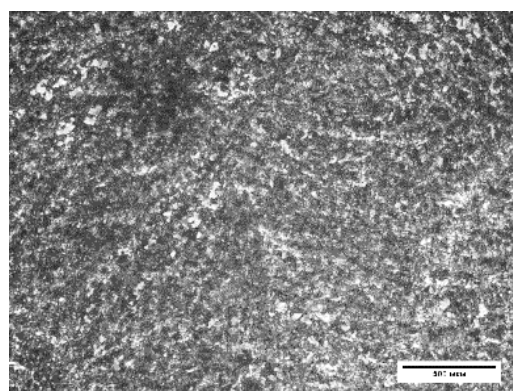
Рисунок 1. – Внешний вид заготовки «штулка»

Таблица. – Режимы электронно-лучевой сварки образцов

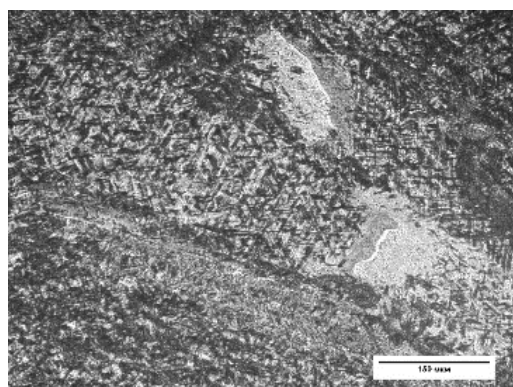
Наименование	Ток фокусировки $I_{\text{фок}}$ , мА	Ток сварки $I_{\text{с}}$ , мА	Скорость сварки, мм/с
Образец 1	685	75	10
Образец 2	670	70	10
Образец 3	670	70	10
Образец 4	670	84	12
Образец 5	670	84	12



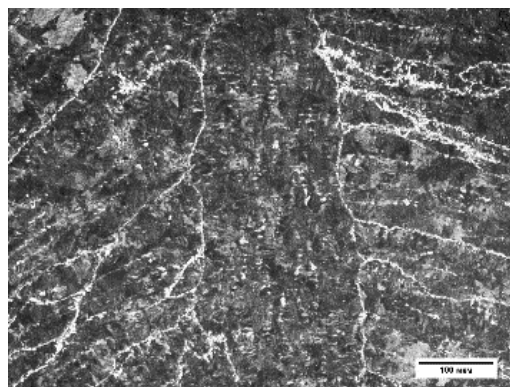
а



б



в

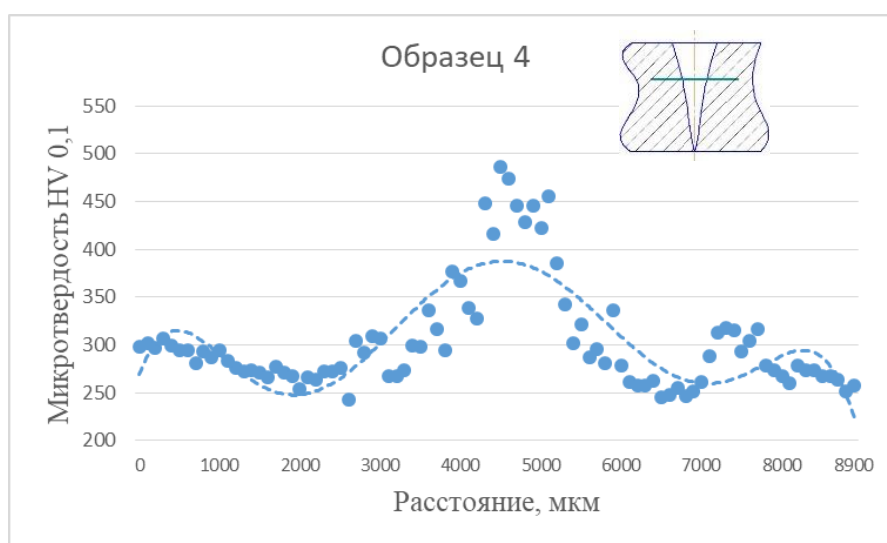


г

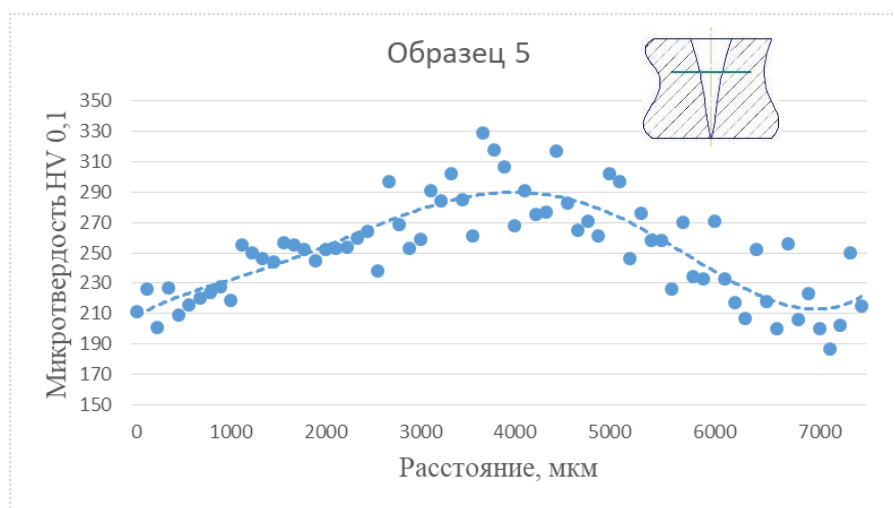
Рисунок 2. – Микроструктура стали после ЭЛС в верхней центральной зоне образцов №1 (а) и №5 (б),  $\times 50$  и в центральной зоне образцов №1 (в) и №5 (г),  $\times 200$

При ЭЛС без предварительного подогрева из-за интенсивного охлаждения зоны сварного шва путем отвода тепла в холодный металл формируется неомогенная мелкодисперсная структура (рисунок 2, в). Фазовый состав (перлитные зерна с ферритной сеткой по границам крупных осей дендритов) зоны сварного шва образца, сваренного с подогревом (рисунок 2, г), более равномерный. Предварительный подогрев оказал значительное влияние также и на структуру ЗТВ, выраженное в увеличении размера зерен перлита в микроструктуре образца №5.

Измерены распределения микротвёрдости в поперечном сечении сварного шва (рисунок 3).



а



б

Рисунок 3. – Графики распределения микротвёрдости в поперечном сечении шва: на образце №4 без подогрева (а), образце №5 с подогревом (б)

В образцах без предварительного подогрева значение микротвёрдости области шва и ЗТВ значительно (на 150-200 HV) отличается от значения для основного металла (рисунок 3, а). На образце №5, который подвергался предварительному подогреву, отличие менее заметное (около 90 HV) (рисунок 3, б). Это связано со снижением скорости охлаждения металла путем отвода тепла в окружающий материал по сравнению с более холодным образцом №4.

**Заключение.** Для получения качественного сварного соединения с глубиной проплавления 7 мм на деталях типа «втулка» из стали 35 целесообразно использовать электронно-лучевую сварку с предварительным подогревом детали. Путем регулирования теплового состояния свариваемого изделия можно управлять структурой и свойствами материала детали.

## КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИЙ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЕННОЙ ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ

**М.Н. БОСЯКОВ, А.Н. МОЙСЕЕНКО, А.А. ГРИЦУК**

**Физико-технический институт НАН Беларуси, Минск, Беларусь**

*Представлены особенности оборудования высокотемпературной ионно-плазменной химико-термической обработки со встроенной системой радиационного нагрева и ускоренного охлаждения и технологических процессов цементации.*

В Физико-техническом институте НАН Беларуси налажено производство по заказам предприятий промышленного оборудования ионно-плазменной химико-термической обработки (азотирования и нитроцементации) с требуемыми габаритными размерами вакуумных камер). Таким оборудованием оснащены как крупные машиностроительные заводы Беларуси и России, так и предприятия, относящиеся к среднему бизнесу.

В последние годы разработана и изготовлена установка ионно-плазменной цементации нового поколения со встроенной системой радиационного нагрева и ускоренного охлаждения, которая позволяет реализовывать высокотемпературные (до 1000 °С) плазменные процессы химико-термической обработки (ХТО) – цементацию и нитроцементацию (рисунок 1).

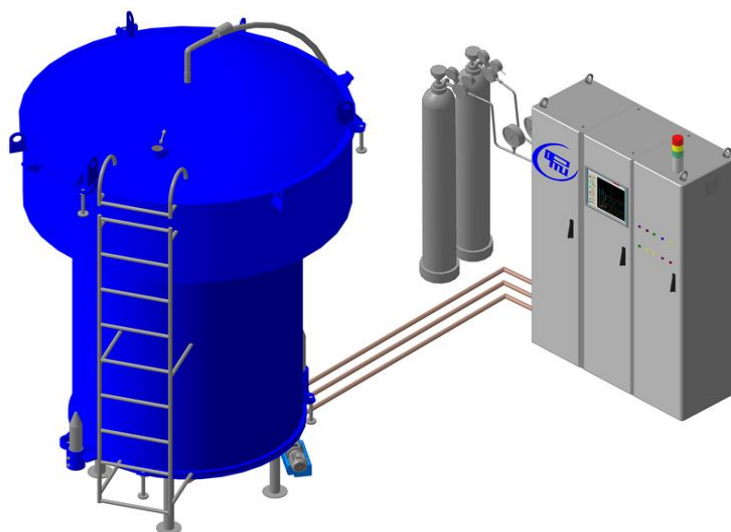


Рисунок 1. – Оборудование высокотемпературной ионно-плазменной ХТО

Технологическая схема проведения процесса ионной цементации на установке промышленного типа состоит из следующих циклов:

- 1) нагрев до температуры 930 °С за 4-6 ч в зависимости от массы садки;
- 2) выдержка – диффузионное насыщение углеродом в течение 5-16 ч в зависимости от необходимой глубины слоя;
- 3) охлаждение в камере до температуры 700 °С в течение 2–2,5 ч, затем ускоренное охлаждение в среде азота до температуры 200 °С за 3,5-4 ч.
- 4) разгрузка камеры и формирование новой садки.

Закалка деталей после насыщения углеродом должна проводиться с их повторного нагрева. Особенностью процесса диффузионного насыщения в тлеющем разряда является высокая скорость формирования науглероженного слоя – в 2-3 выше, чем при газовой цементации.

Для обеспечения минимальных энергозатрат при проведении процесса рабочая камера установки имеет резистивный трехсекционный нагреватель суммарной мощностью 60 кВт. Теплоизоляция стенок камеры выполнена с применением муллитокремнеземистого картона, а для обеспечения ускоренного охлаждения садки используется центробежный вентилятор, расположенный в нижней части камеры.

В ходе технологического процесса на установке осуществляется контроль следующих параметров, которые отображаются на дисплее компьютера в виде графического протокола процесса:

- рабочего давления,
- температуры садки,
- температуры муфеля,
- расходов четырёх рабочих газов (аргона, водорода, метана и азота),
- напряжение и ток разряда.

Графический протокол процесса и его ход (время запуска, старт каждого шага, сообщения о неполадках и т.д.) сохраняется с возможностью его просмотра и распечатки на принтере.

Применение автоматизированной системы управления, в том числе удаленного, минимизирует участие оператора в работе установки, «человеческий фактор» практически исключается. Это обеспечивает стабильность поддержания воспроизводимых условий при обработке больших партий изделий. Установки плазменной химико-термической обработки периодического действия производства ФТИ НАН Беларуси могут быть использованы в условиях массового производства.

## АНАЛИЗ И РЕАЛИЗАЦИЯ СХЕМЫ ПОЛИГОНАЛЬНОГО ФОРМИРОВАНИЯ ТРЕУГОЛЬНИКА РЕЛО МЕТОДОМ ОГИБАНИЯ

**А.А. ДАНИЛОВ**

*Белорусский национальный технический университет,  
Минск, Беларусь*

*Определены параметры схемы полигонального профилирования треугольника Рело методом огибания инструментом с круговыми режущими кромками. Показана возможность реализации этого метода на зубодолбежном станке без его модернизации созданными инструментами.*

Треугольник Рело  $ABC$  (рисунок 1) представляет пересечение трех дуг окружности одного радиуса, равного ширине  $b$  треугольника, которые касаются вписанной в него окружности радиуса  $r$ . Вершины треугольника расположены на описанной окружности радиуса  $R_0$ . Параметры  $r$  и  $R_0$  связаны с шириной  $b$  известными зависимостями:  $R_0 = b/\sqrt{3}$ ;  $r = b \left(1 - 1/\sqrt{3}\right)$ .

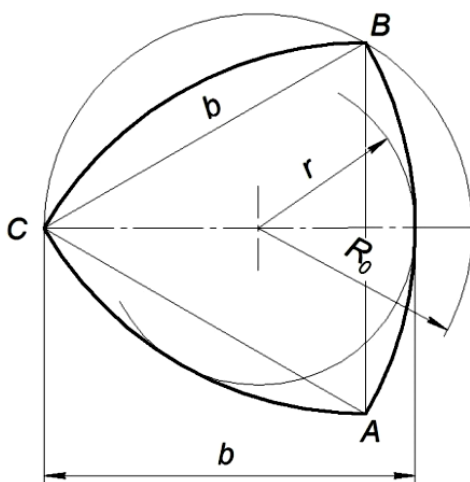


Рисунок 1. – Геометрия треугольника Рело

Для освоения с минимальными затратами производства деталей с таким профилем актуальна разработка технологий их обработки на универсальных станках, реализующих прогрессивные методы формообразования. Эта задача рассматривается ниже применительно к обработке открытых и полужакрытых поверхностей на зубодолбежном станке.



Известен способ обработки таких поверхностей на зубодолбежном станке методом обката [1], по которому специальному долбяку 1 (рисунок 2) и заготовке 2 сообщают согласованные противоположно направленные вращательные движения, соответственно  $B_1$  и  $B_2$ . Недостатки способа – сложность изготовления и переточки режущего инструмента, а также влияние геометрии режущей кромки на точность формообразования профиля поверхности. Они устраняются при полигональном профилировании методом огибания производящей окружности [2] (рисунок 3). Заготовке 1 и режущему инструменту 2 сообщают одинаково направленные вращательные движения  $B_1$  и  $B_2$  с равными угловыми скоростями вокруг параллельных осей, соответственно 3 и 4.

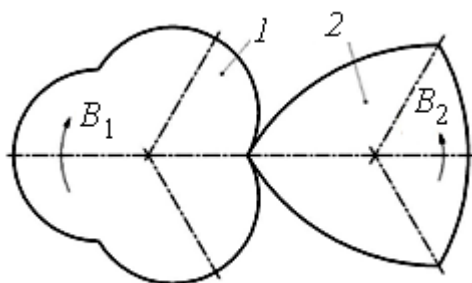


Рисунок 2. – Схема формирования треугольника Рело методом обката

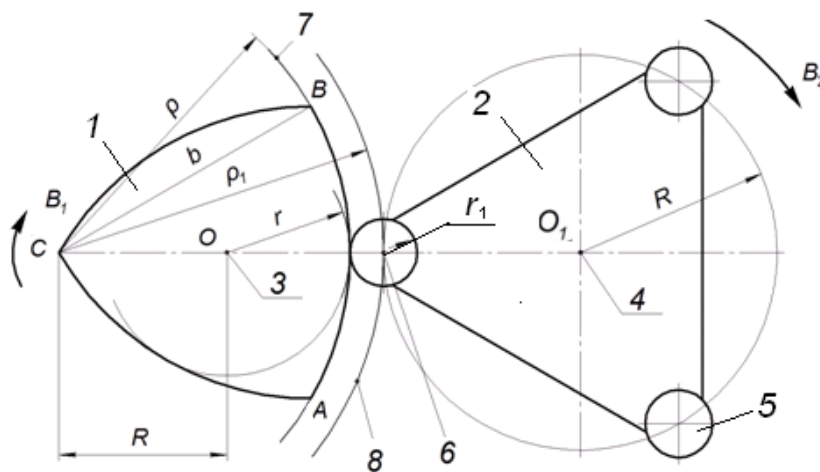


Рисунок 3. – Схема формирования треугольника Рело методом огибания

Инструмент имеет три режущих лезвия 5, например, в виде круглых сменных пластин радиусом  $r_1$ , центры 6 круговых режущих кромок которых равномерно расположены по окружности радиусом  $R$ .

Значение  $R$  определяется из схемы профилирования (см. рисунок 3), согласно которой окружность 7 радиусом  $r$ , ограничивающая сторону  $AB$



треугольника Рело ABC, формируется как огибающая окружности радиусом  $r_1$ , центр которой перемещается относительно заготовки 1 по окружности 8 радиусом  $\rho_1$ , эквидистантой окружности 7. Окружность 8 является траекторией точки 6 в движении относительно неподвижной заготовки 1. Аналитически установлено, что центр окружности 8 смещён влево от оси 3 вращения заготовки 1 на расстояние ОС, равное  $R$ . С другой стороны, ОС – радиус описанной вокруг треугольника Рело окружности  $R_0$  (см. рисунок 1), следовательно,  $R = R_0$  и  $R = b\sqrt{3}$ .

Так как окружность 7 эквидистантна окружности 8, то ее центр также расположен в той же точке С, что и центр окружности 8. Поэтому линию 7 можно рассматривать как окружность, формирующую сторону АВ треугольника Рело ABC шириной  $b$ .

Окружность 7 образует на заготовке 1 профиль АВ одной из граней поверхности детали. Так как угловые скорости заготовки 1 и режущего инструмента 2 равны, то две его другие круговые режущие кромки формируют остальные стороны СВ и СА треугольника Рело.

В соответствии с рисунком 3  $b=R+r$ , следовательно, радиус  $r_1$  круговой режущей кромки не влияет на ширину  $b$  формируемого треугольника Рело, что позволяет многократно перетачивать режущие лезвия 5 или периодически заменять их. Благодаря этому профилирование треугольника Рело методом огибания круговой режущей кромкой имеет существенные преимущества по сравнению с методом обката долбяком с криволинейными режущими кромками [1], от формы которых зависит образуемый профиль. Оснащение инструмента сменными круглыми пластинками позволяет технически просто восстанавливать его режущую способность и точность, что невозможно при применении технологии [1].

Достоверность результатов аналитического исследования подтверждена компьютерным моделированием и экспериментально на зубодолбежном станке (рисунок 4) цельным инструментом с круговыми режущими кромками и инструментом со сменными круглыми режущими пластинками [3]. Подтверждена возможность полигонального формирования треугольника Рело методом огибания на зубодолбежном станке обкатного типа без его модернизации. Установлено, что созданные инструменты обеспечивает шероховатость обработки поверхности с профилем поверхностей в виде треугольника Рело опытными образцами инструментов  $R_a = 1,01-1,15$  мкм и 8-9 качества точности геометрических параметров обработанных деталей, что позволило рекомендовать разработанную технологию к

использованию в производстве деталей профильных моментопередающих соединений.

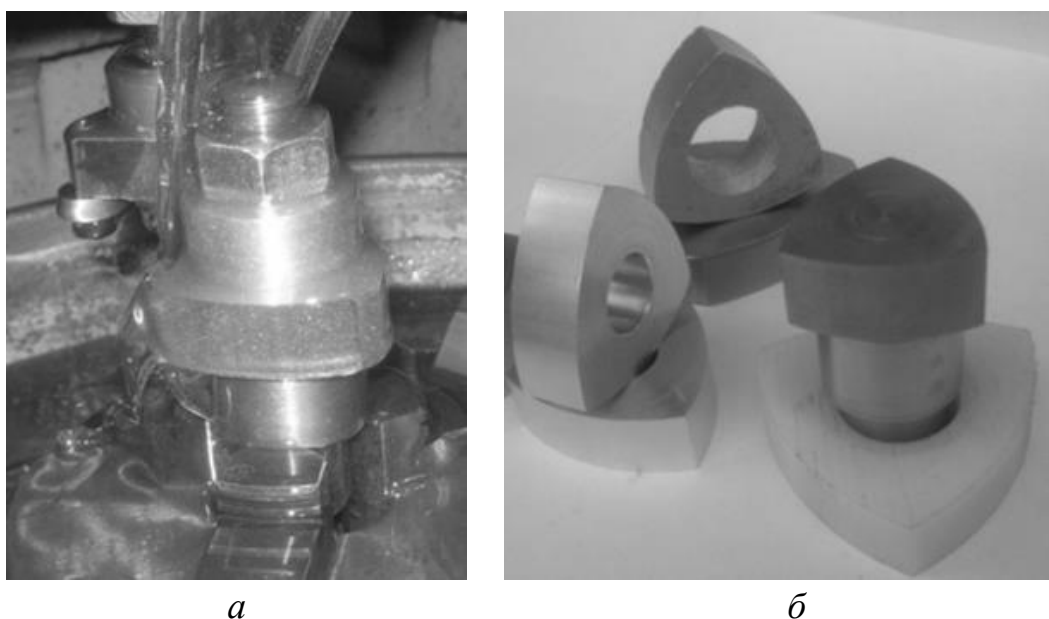


Рисунок 4. – Рабочая зона станка (а) и образцы обработанных изделий (б)

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Понкратов, П.А. Разработка эффективного долбежного инструмента для обработки сложных криволинейных поверхностей: автореф. дис. ... канд. техн. наук / П.А. Понкратов. – Курск, 2013 г. – 20 с.
2. Способ обработки некруглых деталей с треугольным профилем равной ширины : Евразийский патент 031383 / А.А. Данилов, В.А. Данилов. – Оpubл. 28.12.2018.
3. Пантелеенко, Ф.И. Обработка моментопередающих поверхностей с профилем в виде треугольника Рело на зубодолбежном станке / Ф.И. Пантелеенко, А.А. Данилов, И.К. Карась // Горная механика и машиностроение. – 2018. – №4. – С. 59-65.

## ИЗНОС РЕЗЦОВ ПРИ РОТАЦИОННОМ ТОЧЕНИИ СИНУСОИДАЛЬНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

**В.А. ДАНИЛОВ**

*Белорусский национальный технический университет,*

*Минск, Беларусь*

**А.Н. СЕЛИЦКИЙ**

*Полоцкий государственный университет, Беларусь*

*Приведены результаты экспериментального исследования изнашивания и определения стойкости принудительно вращающегося круглого резца при ротационном точении синусоидальных цилиндрических поверхностей.*

Прогрессивным методом обработки синусоидальных цилиндрических поверхностей является точение эксцентрично установленным принудительно вращающимся круглым резцом [1]. Параметры схемы обработки этим методом существенно отличаются от традиционного ротационного точения круглых поверхностей. Например, кинематический коэффициент, равный отношению окружных скоростей резца и заготовки в зоне резания, может принимать значения до 9 в зависимости от параметров синусоидальной поверхности, резца и заготовки, а глубина резания непрерывно изменяется за время одного оборота круглой заготовки. В этой связи для практической реализации данного метода актуально исследование изнашивания и определение стойкости резца при различных условиях обработки.

Стойкостные испытания ротационных резцов выполнены на шлицефрезерном станке модели HECKERT GFLV-250. Обрабатывались заготовки из стали 40Х диаметром 25...45 мм круглыми резцами из быстрорежущей стали Р6М5 диаметром 55...60 мм, значения статических углов которых: передний угол  $10^\circ$ , задний –  $20^\circ$ ; биение режущего лезвия 0,01...0,02 мм. Параметры схемы обработки: количество выступов синусоидального профиля – 3; кинематический коэффициент  $k = 2...9$ ; эксцентриситет установки резца относительно оси его вращения  $e = 1,5$  мм; частота вращения резца  $n_r = 56; 71; 90$  мин<sup>-1</sup>; глубина резания –  $t = 0,5...3$  мм; подача –  $s_o = 0,134...0,67$  мм/об. Резание производилось с охлаждением маслом И-20.

Износ передней и задней поверхностей резцов измерялся на микроскопе Nikon Epihot 200 с точностью 0,005 мм при увеличении в 50 раз. Исследование изнашивания резца выполнено при  $k = 3,6$ ;  $n_r = 56 \text{ мин}^{-1}$ ;  $t = 3 \text{ мм}$ ;  $s_o = 0,5 \text{ мм/об}$ . В течение первых 20 минут работы резца на режущей кромке образуются микросколы, а на обработанной поверхности – соответствующие выступы. В дальнейшем происходит округление режущего лезвия, устраняющее микросколы. Шероховатость обработанной поверхности в течение 300 мин резания остается практически постоянной, а на задней поверхности резца образуется фаска шириной до 0,2 мм. При дальнейшей обработке режущее лезвие округляется, радиус округления достигает 0,25 мм, появляются сколы, что сопровождается ухудшением качества обработанной поверхности.

Таким образом, можно выделить следующие этапы изнашивания резца: образование микроскалываний на режущем лезвии, их выравнивание, образование фаски износа на задней поверхности, округление режущего лезвия, образование сколов.

Установлено, что передняя поверхность резца подвергается адгезионному износу, о чем свидетельствуют прилипшие частицы стружки (рис. 1, а), которые образуются преимущественно на участке режущей кромки, соответствующем минимальной глубине резания, а также абразивному износу, проявлением которого являются царапины на передней поверхности резца (рис. 1, б).

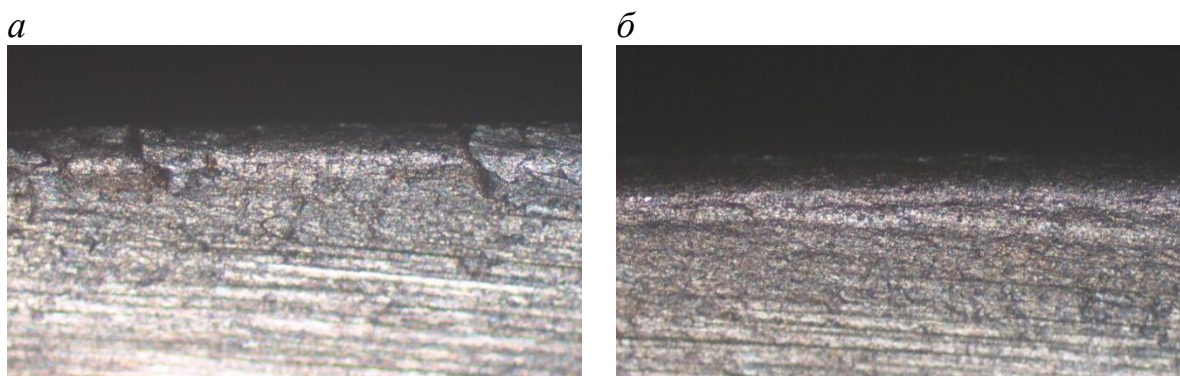


Рисунок 1. – Фотографии изношенных участков передней поверхности резца:  
а (б) – участок, соответствующий минимальной (максимальной) глубине резания;  
( $k = 3,6$ ;  $n_r = 56 \text{ мин}^{-1}$ ;  $t = 3 \text{ мм}$ ;  $s_o = 0,5 \text{ мм/об}$ ;  $\tau = 335 \text{ мин}$ )

В большей степени изнашивается задняя поверхность резца, что сопровождается образованием фаски износа, выкрашиванием режущей кромки (рис. 2) и вызвано повышенной скоростью скольжения задней по-

поверхности относительно заготовки, особенно с увеличением кинематического коэффициента. Отмечено также образование на резце оксидной пленки от светло-желтого цвета при минимальной глубине резания (рис. 2, а) до фиолетового – при максимальной глубине (рис. 2, б), что свидетельствует о неравномерности температуры вдоль режущей кромки, способствующей неравномерному изнашиванию резца.

Непрерывное изменение глубины резания является причиной переменной по длине режущей кромки величины износа: после обработки в течение 110 мин неравномерность износа составила 0,01...0,015 мм при диаметре резца 55 мм.

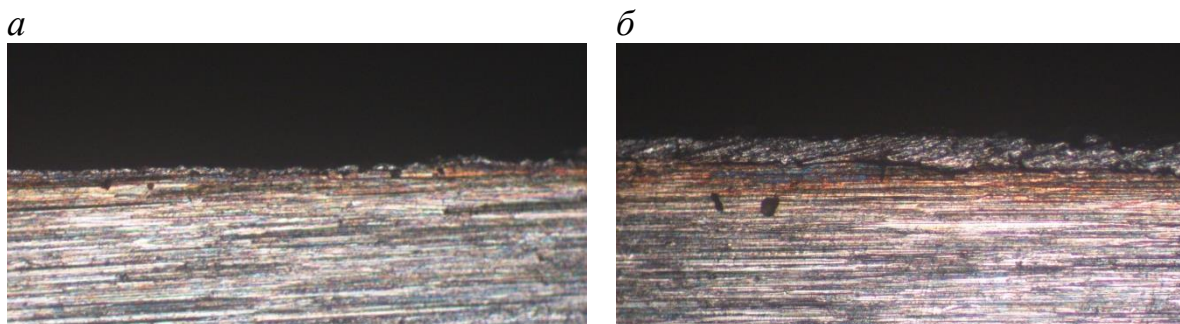


Рисунок 2. – Фотографии изношенных участков задней поверхности резца: а (б) – участок задней поверхности, соответствующий минимальной (максимальной) глубине резания; ( $k = 3,6$ ;  $n_r = 56 \text{ мин}^{-1}$ ;  $t = 3 \text{ мм}$ ;  $s_o = 0,5 \text{ мм/об}$ ;  $\tau = 335 \text{ мин}$ )

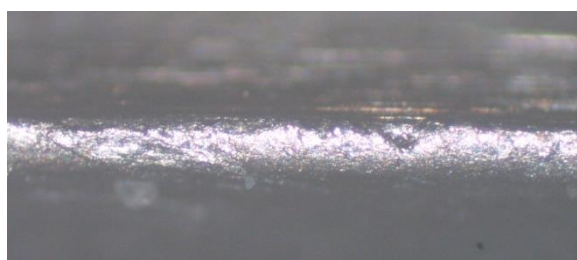


Рисунок 3. – Фотография участка режущего лезвия с округлением режущего лезвия

Сколы и округление режущего лезвия (рис. 3) наступают раньше образования критической фаски износа, поэтому она не может служить критерием затупления резца. В связи с этим при назначении периода стойкости резца целесообразно использовать технологический критерий его затупления, характеризую-

щийся допускаемой шероховатостью обработанной поверхности.

Для уменьшения микроскалываний на режущем лезвии и сокращения времени приработки рекомендуется при заточке придать ему округление радиусом 0,01-0,03 мм.

Следует отметить высокую стойкость резца, которая, например, при обработке трехгранной синусоидальной поверхности средним диаметром 45 мм с кинематическим коэффициентом 3,6, частотой вращения резца  $56 \text{ мин}^{-1}$ ,

PolotskSU

максимальной глубиной резания 3 мм, подачей 0,5 мм/об составила 335 мин при шероховатости обработанной поверхности 2,0 мкм, что свидетельствует об эффективности ротационного точения синусоидальных цилиндрических поверхностей эксцентрично установленным принудительно вращающимся круглым резцом и позволяет рекомендовать этот метод обработки для обработки валов профильных моментопередающих соединений.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Данилов, В.А. Анализ и реализация схем обработки профильных цилиндрических поверхностей ротационным инструментом / В.А. Данилов, А.Н. Селицкий // Горная механика и машиностроение: международный научно-технический. – 2012. – №4. – С. 71-82.

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ  
ГОМОГЕНИЗИРУЮЩЕЙ ГОЛОВКИ ГОМОГЕНИЗАТОРА FBF 075  
В УСЛОВИЯХ ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЯ**

**А.А. ПОТАПОВ, О.П. ШТЕМПЕЛЬ**

*Полоцкий государственный университет, Беларусь*

*В работе описывается принцип работы гомогенизирующей головки гомогенизатора FBF 075, причины износа кавитационной эрозии, и её способы уменьшения воздействия на деталь. Рассмотрены материалы для изготовления гомогенизирующей головки и нанесение защитных покрытий, повышающие стойкость к эрозии в условиях импортозамещения.*

В настоящее время сельскохозяйственной промышленности уделяется особое внимание, т.к. она направлена на обеспечение населения продовольствием и получения сырья для ряда отраслей, одной из которых является молочная промышленность. Важной стадией при обработке кисломолочных продуктов является гомогенизация. Гомогенизация – это диспергирование массы продукта на более мелкие фракции. Аппаратом, который решает эту задачу, является гомогенизатор [1].

Диспергирование, достигается благодаря гомогенизирующим ступеням. Гомогенизирующая первая и вторая ступени представляет собой две гомогенизирующие головки аналогичной конструкции, связанные каналом, позволяющим продукту под высоким давлением переходить последовательно от первой ступени ко второй [2].

Гомогенизирующая головка является важной и в тоже время самой быстроизнашивающейся деталью. Работа посвящена обеспечению работоспособности гомогенизатора FBF 075 в условиях импортозамещения, а именно исследованию гомогенизирующей головки, т.к. она служит в среднем 6 месяцев, а ценовой диапазон ее приобретения составляет 5000 белорусских рублей и представляется она только в оригинальном виде импортного производства, т.к. отечественных аналогов не существует.

При анализе условий работы гомогенизирующих ступеней выявлено, что износ гомогенизирующей головки происходит из-за явления под названием кавитация, которая возникает при разности давлений, скорости потока жидкости и температур. Основной проблемой в кавитации является эрозия.



Высокие быстро меняющиеся давления и тепловые ударные волны, вызывают в материале вблизи разрывающегося пузырька разрушения (Рис. 1), приводящие к неудовлетворительной гомогенизации.



Рисунок 1. – Фаска изношенной гомогенизирующей головки

Следует отметить, что кавитация является неотъемлемой частью, благодаря которой возникает диспергирование продукта, но и является причиной быстрого износа гомогенизирующей головки, поэтому анализируем способы защиты от кавитационной эрозии. Самые эффективные способы являются:

- 1) изменение гидравлических режимов работы местного сопротивления;
- 2) конструирование гидравлических устройств и элементов, обеспечивающих минимальную интенсивность процесса кавитационной эрозии;
- 3) использование таких средств как подача газа в частности воздуха, в места возникновения кавитации;
- 4) добавление специальных присадок в рабочие жидкости, уменьшающие ее коррозионные свойства;
- 5) выбор материалов с повышенной кавитационной стойкостью;
- 6) катодная защита.

В нашем случае мы не можем использовать пункты 1, 2, 3, 4 и 6 т.к. они нарушат кавитационную характеристику потока, вследствие чего изменится дисперсность и санитарно-гигиенические нормы продукта, единственным решением является выбор материалов с повышенной кавитационной стойкостью [3, 4].

Для более качественного выбора материалов анализируем изношенную гомогенизирующую головку. Результаты исследования получили следующие: Головка состоит из 2-х частей корпуса(а) и наконечника(б) (Рис.2); Наконечник изготовлен из сплава на основе вольфрама, легированного Cr, Ni, Mo, Fe и т.д. а корпус изготовлен из хромоникелевой коррозионностойкой стали.

Результаты микродюрометрического анализа – 1235 (HV) и анализ микроструктуры материала наконечника (Рис. 3), свидетельствует что он получен методом порошковой металлургии из порошка вольфрама легированного Cr, Fe, Mo, Ta, Ni.



Проведенные исследования позволяют, сделать вывод, что оригинальная гомогенизирующая головка гомогенизатора FBF 075 импортного производства соответствует высокому уровню технического исполнения и качества, а также благодаря исследованиям обоснованно можем подобрать материалы для изготовления гомогенизирующей головки с последующим упрочнением.

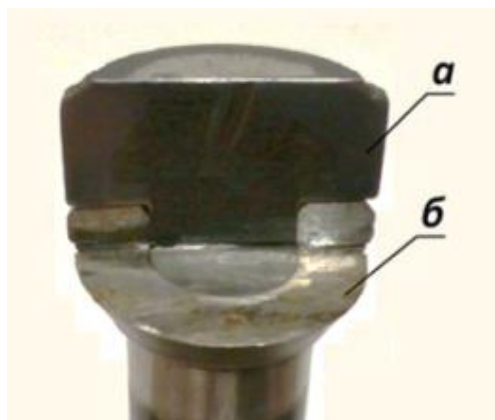


Рисунок 2. – Разрез гомогенизирующей головки



Рисунок 3. – Микроструктура наконечника гомогенизирующей головки

Для подбора материала для изготовления нужно придерживаться следующим критериям: материал должен соответствовать санитарно-гигиеническим требованиям, критериям импортозамещения, коррозионной и эрозионной стойкости, высоким прочностным характеристикам, износостойкости, микроструктуры и твердости. Исходя из исследований, для изготовления наконечника рекомендовано применить следующие марки сталей: мартенситно-старееющую сталь марки Н12К12М10ТЮ и быстрорежущую сталь марки Р6М5 которые обладает высокой прочностью при достаточной пластичности и вязкости, высоким сопротивлением малым пластическим деформациям, хрупкому и усталостному разрушению, применя-

ется в машиностроении, приборостроении и инструментальной промышленности.

Для повышения долговечности работы гомогенизирующей головки целесообразно использовать упрочнение для наконечника. К методу упрочнения и материалов для его использования нужно руководствоваться теми же критериями. Изучив различные современные методы упрочнения материалов можем сделать вывод, что применив вакуумно-который имеет высокие прочностные характеристики обеспечивающие повышенную эрозийную стойкость поверхности деталей, а так же полностью инертен в пищевой промышленности, мы существенно увеличим долговечность работы гомогенизирующей головки и сможем достичь результатов существенно не уступающих по прочностным характеристикам и долговечности оригинальной гомогенизирующей головки гомогенизатора FBF 075 изготовленной за рубежом.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Крусь Г.Н. Тиняков В.Г. Фофанов Ю.Ф. Технология молока и оборудование предприятий молочной промышленности. М.: Агропромиздат. 1986. – 280 с
2. Мегедь В. Справочник - Технология производства молочных продуктов - Раздел Гомогенизаторы 2005.- 7с
3. Пирсол И., Кавитация. Перевод. с англ., Журавлева Ю.Ф. Ред., предисл. и дополнено Л.А. Эпштейна. М., “Мир”, 1975. 95с. с ил.
4. Арзуматов Э.С. Кавитация в местных гидравлических сопротивлениях. – М.: Энергия, 1978.- 304 с., ил.

## МЕХАНИЗМ САМООРГАНИЗАЦИИ ДВИЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОЛИТА В УСЛОВИЯХ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОГО ПОЛИРОВАНИЯ

**Ю.В. СИНЬКЕВИЧ**

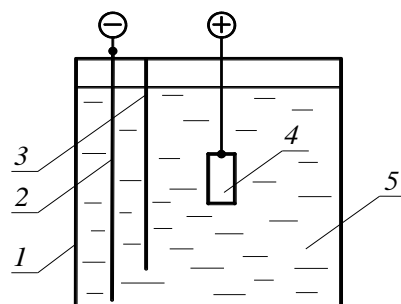
*Белорусский национальный технический университет,  
Минск, Беларусь*

*Предложен механизм самоорганизации движения потоков в электролите в условиях электроимпульсного полирования. Показано, что основными потоками, оказывающими наибольшее влияние на структуру и динамику парогазовой оболочки, являются восходящий, обратный и торцевой потоки.*

При электроимпульсном полировании скорость и направление движения гидродинамических потоков в электролите оказывают значительное влияние на устойчивость, структуру и толщину парогазовой оболочки, которые, в свою очередь, оказывают влияние на качество поверхности, точность и производительность обработки. Выявление основных закономерностей и математическое моделирование гидродинамических потоков в электролите будут способствовать установлению механизмов электрической проводимости парогазовой оболочки и съема металла с обрабатываемой поверхности, а также позволят расширить область практического применения традиционной технологии электроимпульсного полирования и разработать новые технологии, в частности, методом прокачки электролита и с использованием свободных и затопленных струй.

Экспериментальное исследование самоорганизованных гидродинамических потоков в электролите проводилось в стеклянной кубической электролитической ячейке размером 400х400х400 мм (рисунок 1) при электроимпульсном полировании образцов в 6%-ном водном растворе сульфата аммония при температуре раствора 75–80 °С и напряжении обработки 300±5 В. Образец 4 из стали 12Х18Н10Т в виде плоской пластины размером 40х30х4 мм, цилиндра Ø5х40 мм или шара Ø15 мм располагался в электролите 5 на вертикальной оси ячейки 1 на расстоянии 100 мм от зеркала электролита. Плоский катод 2 располагался вертикально вдоль одной из стенок ячейки. Для снижения возможного влияния потоков, вызванных движением ионов раствора в электрическом поле, на общую кар-

тину гидродинамических потоков в электролите катод отделялся от общего объема электролита сплошной диэлектрической перегородкой 3, установленной вертикально на расстоянии 10 мм от дна ячейки. Для визуализации потоков в электролите в раствор вводилась мелкодисперсная диэлектрическая химически нейтральная присадка, обладавшая плавучестью.



1 – корпус ячейки; 2 – катод; 3 – диэлектрическая перегородка;  
4 – образец; 5 – электролит

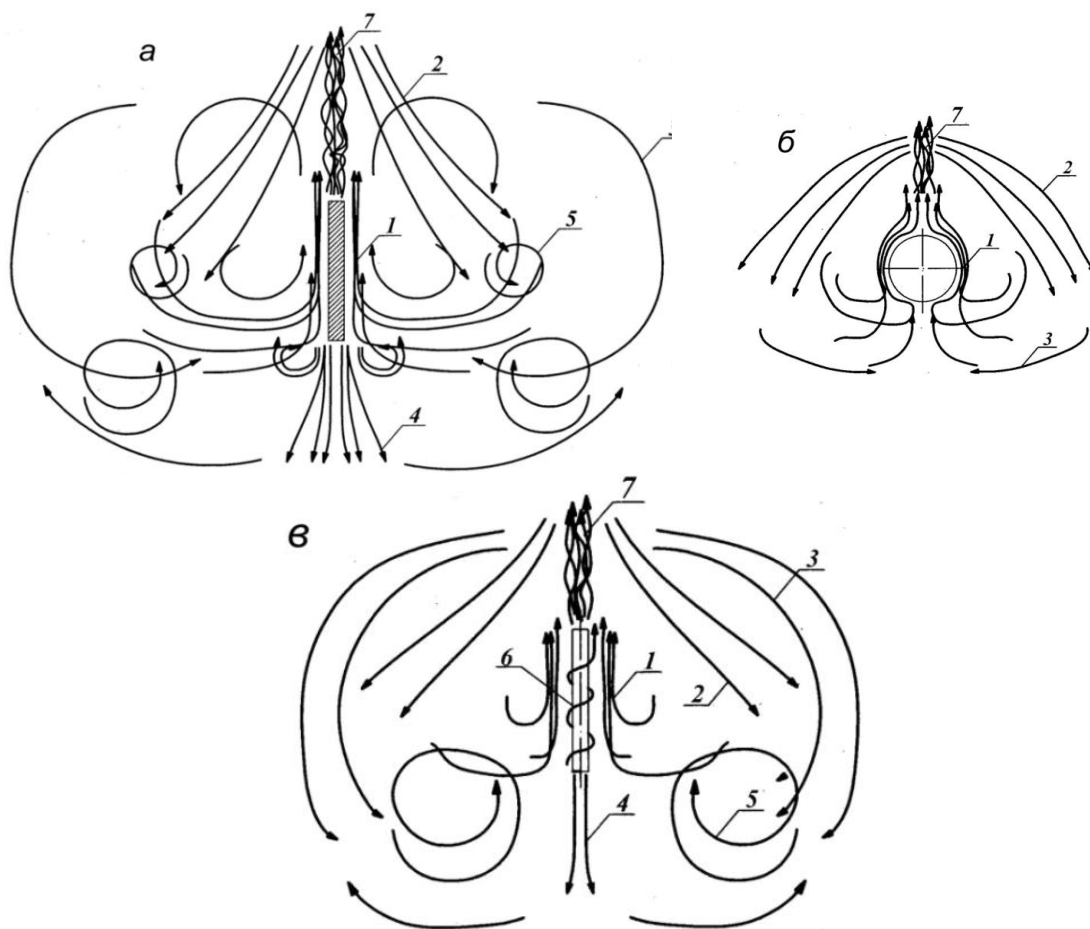
Рисунок 1. – Схема электролитической ячейки

Визуальное наблюдение за потоками осуществлялось через верхнюю и боковые поверхности электролитической ячейки. Общая картина движения потоков фиксировалась цифровой видеокамерой DCR-НС 42Е (SONY, Япония) после выхода системы «электролит–парогазовая оболочка–образец» в квазистационарное состояние, при котором гидродинамические потоки в электролите приобретали установившееся движение.

Визуальные наблюдения за движением электролита в процессе обработки и анализ видеосъемки показали, что при электроимпульсном полировании плоского, цилиндрического и сферического образцов наблюдаются подобные гидродинамические потоки и завихрения, схема которых представлена на рисунке 2.

Водяной пар и газы в парогазовой оболочке, перемещаясь вверх вдоль обрабатываемой поверхности, за счет сил трения увлекают за собой электролит в приграничной с парогазовой оболочкой области, организуя восходящий поток 1. Его организации и поддержанию в незначительной степени также способствует конвективное движение электролита. Сталкиваясь с зеркалом электролита, восходящий поток отражается от него под некоторым углом, образуя обратный поток 2, которому придается ускорение движению вследствие выхода пара и газа в атмосферу и схлопывания пузырьков пара и газа в приповерхностном слое электролита. Часть обратного потока под действием сил трения выделяется в расходящийся круго-

вой поток 3. Пульсация парогазовой оболочки в области нижнего торца образца и кавитационное схлопывание пузырьков пара и газа способствуют возникновению и ускорению движения торцевого потока 4. При полировании сферического образца торцевой поток визуально не наблюдался. Круговой поток 3, постепенно теряя энергию, сталкивается с замедляющимися обратным 2 и торцевым 4 потоками и образует завихрения – вихревой поток 5.



Наименование потока: 1 – восходящий; 2 – обратный; 3 – круговой; 4 – торцевой; 5 – вихревой; 6 – спиралевидный; 7 – турбулентный  
Рисунок 2. – Схема самоорганизованных гидродинамических потоков в электролите при электроимпульсном полировании плоского (а), сферического (б) и цилиндрического (в) образцов

Спиралевидный поток 6 возникал только в случае, когда продольная ось цилиндрического образца была отклонена от вертикали. Очевидно, что причины возникновения спиралевидного потока 6 аналогичны причинам возникновения восходящего потока 1. Турбулентный поток 7 образуется вследствие интенсивного выхода водяного пара и газов из парогазовой

оболочки в атмосферу. Скорость движения водяного пара и газов определяют скорость движения турбулентного потока 7.

Анализ видеосъемки показал, что основными потоками, оказывающими наибольшее влияние на структуру и динамику парогазовой оболочки, являются восходящий, обратный и торцевой потоки. Остальные потоки являются результатом слияния или разветвления основных потоков.

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ  
ХАРАКТЕРИСТИК ЛЕНТОЧНОГО ШЛИФОВАЛЬНОГО  
ИНСТРУМЕНТА МОДЕЛИРОВАНИЕМ РАБОЧИХ СЛОЕВ  
В ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОМ ПОЛЕ**

***А.С. КИРИЕНКО, С.Э. ЗАВИСТОВСКИЙ***  
***Полоцкий государственный университет, Беларусь***

*Статья посвящена результатам исследования процесса моделирования получения рабочих слоев ленточного шлифовального инструмента из ориентированных в электростатическом поле зерен абразива.*

При моделировании эксплуатационных характеристик ленточного шлифовального инструмента необходимо выявить влияние формы геометрии и направленной ориентации абразивных зерен в рабочем слое на работоспособность инструмента и эффективность шлифования. По сравнению с другими инструментами форма и геометрия режущей части, которых определена и известна, геометрия и форма вершин зерен традиционного абразивного инструмента неопределенна. Известно, что при шлифовании инструментом с хаотически направленными зернами абразива на их режущую способность влияет форма микровыступов абразивного зерна, а именно радиус округления  $\rho$  и угол при вершине  $2\gamma$ . Изменение угла при вершине существенно изменяет силы резания. Установлено, что при изменении угла при вершине элемента зерна, контактирующего с поверхностью обработки, с  $60^\circ$  до  $120^\circ$  сила резания увеличивается в 1,5...2 раза. Однако, попытки связать те или иные преимущества абразивного материала с различной формой и геометрией зерен методически имеют ряд недостатков, так как не учитывают взаимное расположение зерен в рабочем слое инструмента, характер и степень перекрытия траекторий зерен в процессе движения, условия взаимодействия материала абразивного зерна с обрабатываемым материалом и образовавшейся стружкой, т.е. кинематические и динамические условия процесса шлифования. Различие в форме и геометрии ориентированных зерен не только не объясняет, а, наоборот, вуалирует приобретаемые в связи с их ориентированностью преимущества. Поэтому для анализа работы ориентированных зерен требуется заменить «неопределенные» зерна зернами эквивалентной формы, поддающимися матема-

тическому описанию. Такая операция связана с упрощением геометрических параметров и утратой некоторых физических свойств реальных зерен, однако позволяет определить влияние ориентированности абразивных зерен в рабочем слое на работоспособность инструмента и эффективность шлифования. В работах П.И. Ящирицына и А. Г. Зайцева, В. Н. Бакуля, А.В. Королева, М. Мацуи, Сато Седзаки при моделировании встречаются следующие допущения: 1) абразивные зерна приводят к форме шара одного радиуса  $r_0$ ; 2) абразивные зерна заменяют цилиндром или эллипсоидом вращения с постоянным соотношением полуосей; 3) режущие вершины зерен заменяют эквивалентным конусом или пирамидой, имеющими угол при вершине, равный некоторой постоянной величине  $2\gamma$ , т.е. не эквивалент зерна, а модель его режущей части. Рассмотрим взаимодействие абразивного зерна и обрабатываемой поверхности заготовки при шлифовании. При врезании абразивного зерна в металл в нем возникают зоны текучести [1]. Удельная мощность взаимодействия абразивного зерна и обрабатываемого металла при шлифовании определили из зависимости

$$N_{y\partial} = K_{pV} \cdot \sigma_B \cdot \sin \Delta\beta \cdot V \quad (1)$$

где:  $K_{pV}$  – коэффициент, учитывающий рост давления в контакте «зерно – металл»;

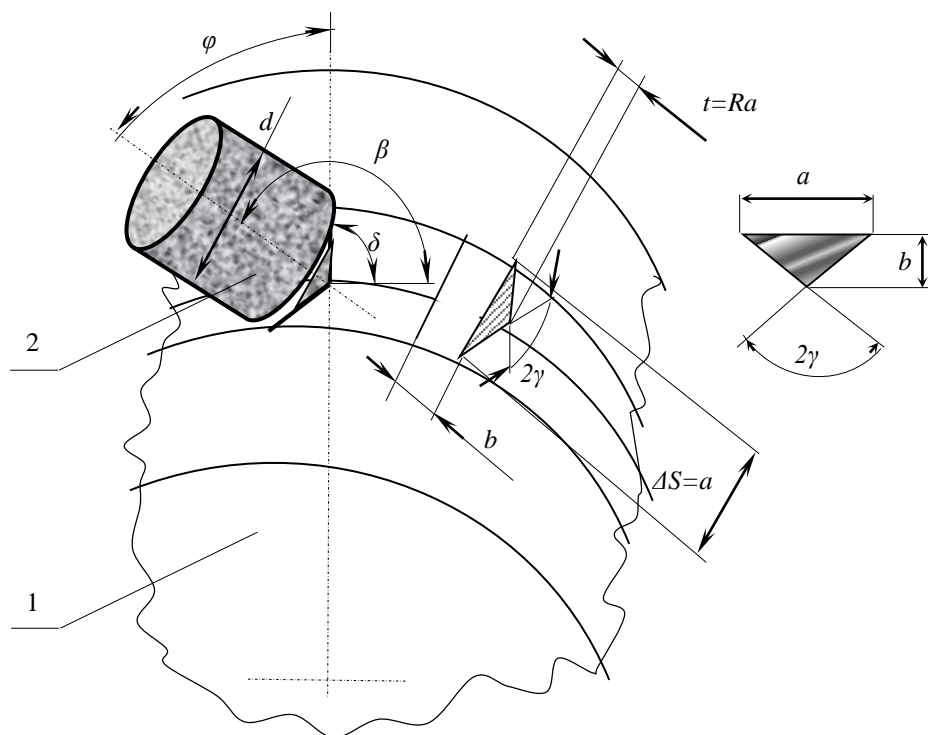
$\sigma_B$  – временное сопротивление разрушению обрабатываемого металла;

$\Delta\beta$  – угол наклона контакта абразивного зерна к поверхности заготовки;

$V$  – скорость резания.

При ударном взаимодействии абразивного зерна и заготовки, в поверхностном слое которой образуются зоны текучести, возникает неустойчивость и локализация пластической деформации. Из [1] известно, что засаливание абразивного зерна снижается по мере роста глубины внедрения абразивного зерна, что приводит к росту объема застойной зоны у передней поверхности, формированию ударной волны, приводящей к переводу металла в пластическое состояние. Соответственно, для повышения удельной мощности взаимодействия абразивных зерен и обрабатываемого металла при прочих равных условиях необходимо сориентировать абразивные зерна в рабочем слое инструмента. В связи с этим представим геометрию резания ориентированным абразивным зерном в соответствии с рисунком 1.





1 – обрабатываемая заготовка, 2 – абразивное зерно  
Рисунок 1. – Схема резания ориентированным абразивным зерном

При исследовании процесса шлифования поверхности заготовки одичным зерном абразива учтено, что величина глубины резания  $t$  и ширина срезаемого слоя  $b$  находятся в прямой зависимости от размеров и геометрии абразивного зерна. Режущую способность ленточного шлифовального инструмента с направленной ориентацией абразивных зерен в рабочем слое определили соотношением объема сошлифованного материала  $V_{общ}$  с заготовки за единицу времени  $\tau$  по формуле

$$Q = \frac{\sum_{i=1}^n a \cdot \sin \beta}{4\tau} \cdot n_i \cdot \pi D \cdot l \cdot n_{об} \quad (2)$$

Исходя из того, что при традиционной схеме хаотического расположения абразива в шлифовальных инструментах примерно 78% зерен являются не режущими, 12% – давящими и только 10% – режущими, можно предположить, что у инструмента с ориентированными зернами все зерна являются режущими [2]. Следовательно, можно допустить, что шлифовальный инструмент с ориентированными зернами абразива в рабочем слое имеет максималь-

ную режущую способность  $Q_{max}$ , а инструмент с хаотическим расположением зерен минимальную  $Q_{min}$ . В соответствии с проведенными расчетами выявлено, что при ориентировании зерен абразива в рабочем слое ленточного шлифовального инструмента его режущая способность может изменяться в диапазоне от  $q_{min} = 0,5k/0,75k = 0,66k$  до  $q_{max} = k/0,75k = 1,33k$  раз, поскольку  $q_{nom} = 1,33k/0,66k = 2$  раза. В соответствии с выражением (2) определены расчетные значения режущей способности  $Q$  ленточного шлифовального инструмента при углах ориентированности  $\beta$  зерен абразива зернистостью  $a$  равной 0,10 мм, 0,16 мм и 0,20 мм (рисунок 2) [3].

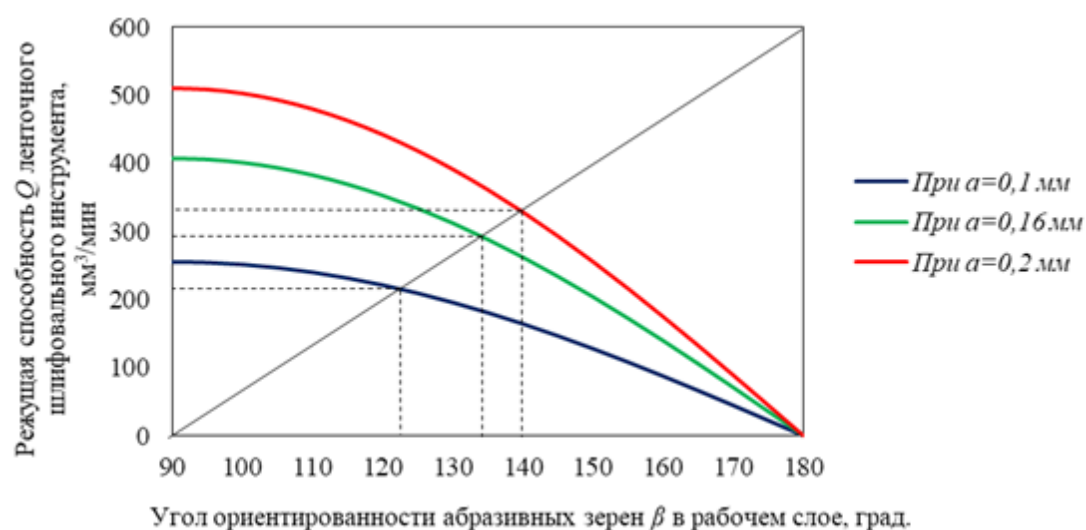


Рисунок 2. — Зависимость режущей способности  $Q$  ленточного шлифовального инструмента от угла ориентированности абразивных зерен  $\beta$

В соответствии с данными расчетов, показанными на рисунке 2 для всех зернистостей абразивных зерен максимальное значение режущей способности  $Q_{max}$  достигается при угле ориентированности абразива относительно основы  $\beta = 90^\circ$ . Например, для абразивных зерен зернистости  $a = 0,1$  мм режущая способность  $Q_{max}$  равна  $255 \text{ мм}^3/\text{мин}$ . Оптимальные значения углов ориентированности  $\beta$  для исследуемых зернистостей абразива установили в соответствии со статистическим методом графического определения оптимальных границ, проведя биссектрису на рисунке 2. В результате для зерен размером  $a = 0,1$  мм оптимальное значение угла ориентированности  $\beta = 123^\circ$  при котором режущая способность  $Q = 214 \text{ мм}^3/\text{мин}$ , что согласуется с алгебраическими расчетами. Для зерен размером  $a = 0,16$  мм  $\beta = 135^\circ$ , а  $Q = 288,98 \text{ мм}^3/\text{мин}$ . Для зерен размером  $a = 0,2$  мм  $\beta = 140^\circ$ , а  $Q = 328,46 \text{ мм}^3/\text{мин}$  [4].

При целенаправленном ориентировании зерен абразива размером  $a = 0,1$  мм под углом  $\beta = 123^\circ$  режущая способность инструмента увеличится в  $q = 214/165 = 1,3$  раза. При ориентировании зерен абразива размером  $a = 0,16$  мм под углом  $\beta = 135^\circ$  режущая способность инструмента увеличится в  $q = 288,98/200 = 1,4$  раза, а при ориентировании зерен абразива размером  $a = 0,2$  мм под углом  $\beta = 140^\circ$  режущая способность инструмента увеличится в  $q = 328,46214/216 = 1,5$  раза, что соответствует прогнозируемому [4, 5].

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бржозовский, Б. М. Влияние смазочно-охлаждающей жидкости на процесс стружкообразования при шлифовании металла / Б.М. Бржозовский, А.В. Славин // Машиностроение и машиноведение. – Саратов : Вестник СГТУ. – 2011. – № 4 (60). – Вып. 2. – С. 138–142
2. Кириенко, А. С. Аспекты формирования рельефа абразивосодержащих поверхностных слоев эластичных инструментов / А.С. Кириенко // Инновационные технологии в машиностроении [Электронный ресурс] : электронный сборник материалов международной научно-технической конференции, посвященной 50-летию По-лоцкого гос. ун-та, Новополоцк, 19-20 апреля 2018 г. / Полоцкий государственный университет ; под. ред. чл.-корр., д-ра техн. наук, проф. В.К. Шелега; д-ра техн. наук, проф. Н. Н. Попок. – Новополоцк, 2018. – С. 81–85.
3. Кириенко, А. С. Получение ориентированного рельефа покрытий из абразивосодержащих дисперсных порошков / А.С. Кириенко, С.Э. Завистовский // Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка : материалы 13-й Междунар. научно-техн. конф. (Минск, 16-18 мая 2018 г.) ; редкол.: А.Ф. Ильющенко (гл. ред) [и др.]. – Минск : Беларуская навука, 2018. – С. 293–296.
4. Кириенко, А. С. Влияние технологических параметров формирования рабочего слоя инструмента с ориентированными зернами на его эксплуатационные характеристики / А.С. Кириенко // Порошковая металлургия: Респ. межвед. сб. науч. тр./ редкол.: А. Ф. Ильющенко [и др.]. - Минск: Беларус. навука, 2018. Вып. 41. – С.257-262.
5. Кириенко, А. С. Инновационные решения в области изготовления эластичных шлифовальных инструментов / А.С. Кириенко, С.Э. Завистовский // Новые технологии и материалы, автоматизация производства: материалы Междунар. научн.-техн. конф., Брест: Издательство БрГТУ, 2019. – С. 83–86

# ОПТИМИЗАЦИЯ РАСПОЛОЖЕНИЯ ЗЕРЕН АБРАЗИВА ПРИ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОМ НАНЕСЕНИИ РАБОЧИХ СЛОЕВ ЭЛАСТИЧНОГО ИНСТРУМЕНТА С УПРАВЛЯЕМОЙ РЕЖУЩЕЙ СПОСОБНОСТЬЮ

**А.С. КИРИЕНКО, С.Э. ЗАВИСТОВСКИЙ**

*Полоцкий государственный университет, Беларусь*

*Статья посвящена результатам исследования получения рабочих слоев из ориентированных в электростатическом поле зерен абразива с целью улучшения рабочих характеристик эластичного инструмента.*

В процессе исследования образцов ленточного шлифовального инструмента из электрокорунда 14А зернистостью от 0,10 до 0,20 мм, полученных методом электростатического нанесения ориентированных в электростатическом поле зерен под углами 90, 110, 120, 140° между основой и вектором напряженности электростатического поля, производилось сравнение полученных экспериментальных показателей износостойкости, режущей способности образцов и прочности закрепления зерен абразива в связке с нормативными значениями [1].

В соответствии с полученными данными исследований построен график зависимости износостойкости от угла ориентированности  $\beta$  зерен абразива в рабочем слое, который с учетом допустимого отклонения принят равным углу между направлением электростатического поля и тканевой основой (рисунок 1) [2].

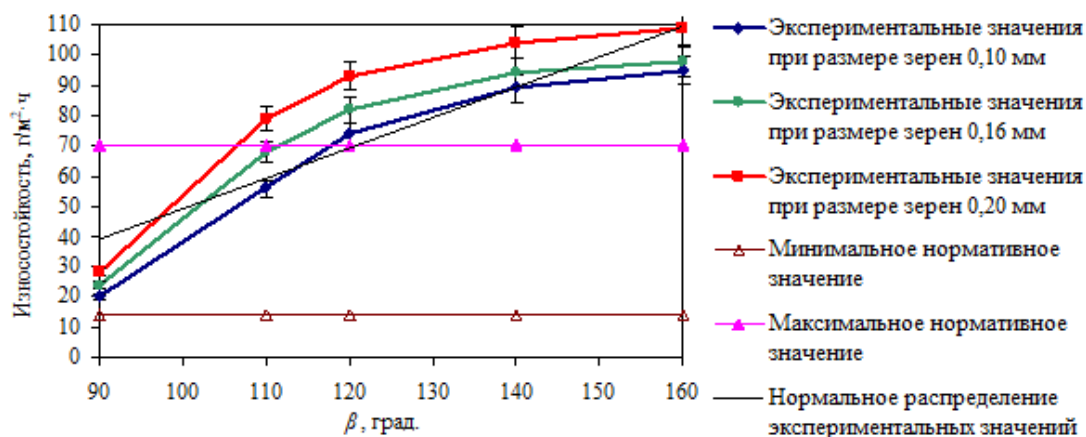
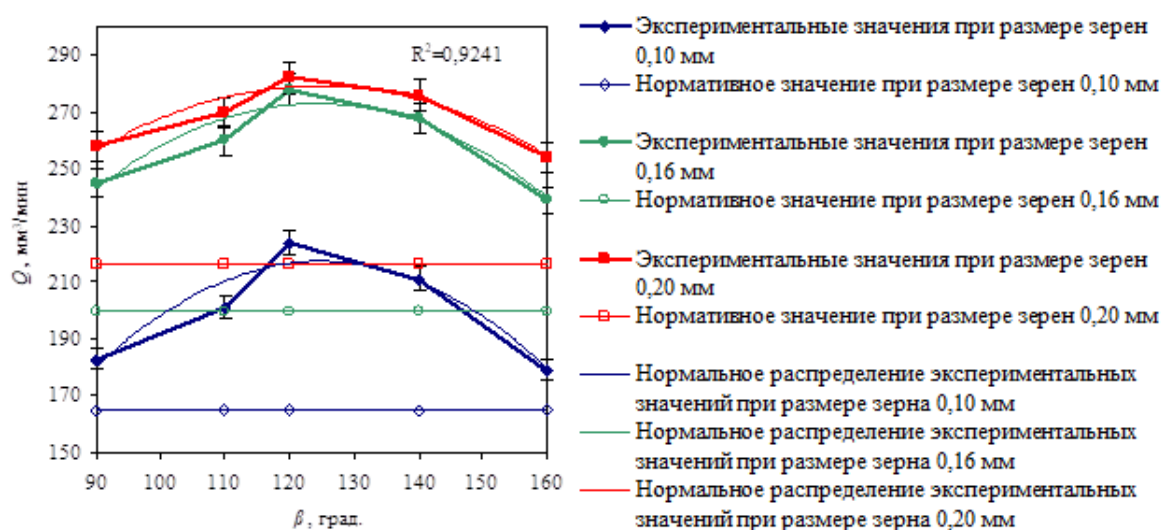


Рисунок 1. — Зависимость износостойкости образцов инструмента от угла ориентированности  $\beta$  зерен абразива в рабочем слое

Соответственно, показатель износостойкости уменьшается с приближением к углу ориентированности абразива в рабочем слое  $\beta = 90^\circ$ , т.е. у инструмента с перпендикулярно закрепленными зернами абразива, относительно поверхности основы износостойкость ниже в сравнении с инструментами, у которых зерна абразива располагаются относительно основы наклонно. Сравнивая экспериментальные значения с нормативными показателями приходим к выводу, что параметры износостойкости инструмента с ориентированными под углом  $90^\circ$  зернами абразива входят в предел нормативных значений равных  $14\text{--}70 \text{ г/м}^2\cdot\text{ч}$ , однако они ниже в 1,2 раза его максимального показателя, а износостойкость инструмента с ориентированными под углами  $120, 140, 160^\circ$  зернами абразива выше максимального нормативного показателя в 1,3–1,5 раза [3].

Результаты исследований режущей способности образцов ленточно-шлифовального инструмента с различными углами ориентированности зерен абразива в рабочем слое обработаны и представлены на графике зависимости режущей способности от угла ориентированности абразива в покрытии (рисунок 2).



Обработка результатов сравнения данных исследований режущей способности экспериментальных образцов инструмента с различными углами ориентированности зерен абразива выявила, что нанесение абразива в электростатическом поле под углами к тканевой основе в диапазоне  $120\text{--}140^\circ$  поз-

воляет повысить режущую способность в 1,3–1,5 раза. У образцов инструмента с углом ориентированности абразива  $\beta = 160^\circ$  самый низкий показатель, что объясняется тем, что при таком угле зерна практически лежат на основе в связи, с чем происходит не микрорезание, а давление тупыми кромками, и рабочий слой быстро засаливается. У инструментов с ориентированностью зерен абразива приближающейся к перпендикулярной, т.е. к  $90^\circ$  также низкий показатель режущей способности, причем он значительно ниже расчетных теоретических значений, что объясняется работой зерен абразива на срез, а не на сжатие и соответственно повышенными значениями разрушающих напряжений, что приводит к быстрому затуплению кромок, вырыванию абразивного зерна из связки из-за их малой заделки и потере режущей способности. Обработка и сопоставление экспериментальных значений с расчетными позволила определить это влияние на показатель режущей способности инструмента в виде коэффициента значимости напряженно-деформируемого состояния поверхности абразива и связки  $k_{зНДС}$  и учесть его при моделировании режущей способности ленточного шлифовального инструмента с ориентированными зернами абразива, получив выражение

$$Q = k_{зНДС} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n a \cdot \sin \beta}{4\tau} \cdot n_i \cdot \pi D \cdot l \cdot n_{об}. \quad (1)$$

Корреляция значений коэффициента значимости напряженно-деформируемого состояния поверхности абразива и связки –  $k_{зНДС}$ , углов ориентированности –  $\beta$  и размера абразива –  $a$  показаны на рисунке 3.

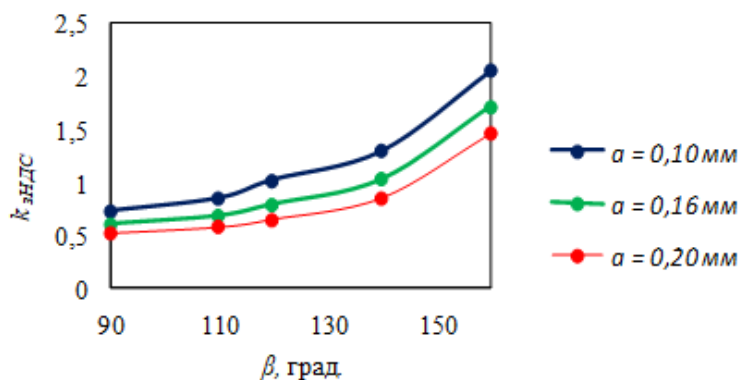


Рисунок 3. – Значения коэффициента значимости напряженно-деформируемого состояния поверхности абразива и связки  $k_{зНДС}$  при различных углах ориентирования  $\beta$  абразивных зерен зернистостью  $a$

Как видно из рисунка 3 характер изменения показателей коэффициента  $k_{зНДС}$  свидетельствует о росте влияния напряженно-деформируемого

состояния поверхности абразива и связки на режущую способность ленточного шлифовального инструмента при ориентировании зерен абразива различной зернистости [4].

Исследования износостойкости и режущей способности образцов позволили определить, что рациональный диапазон углов между направлением электростатического поля и тканевой основы при нанесении рабочих слоев из ориентированных зерен электрокорунда 14А зернистостью от 0,10 до 0,20 мм соответствует  $120\text{--}140^\circ$ . Соответственно, для указанных зернистостей с учетом допустимого отклонения  $\pm 4^\circ$  приняты следующие рациональные углы ориентированности: при  $a = 0,10$  мм угол  $\beta = 120^\circ \pm 4^\circ$ ; при  $a = 0,16$  мм угол  $\beta = 130^\circ \pm 4^\circ$ ; при  $a = 0,20$  мм угол  $\beta = 140^\circ \pm 4^\circ$ . Показатели износостойкости, режущей способности и прочности закрепления абразивного зерна в связке в исследуемых образцах с данными углами ориентированности зерен электрокорунда 14А относительно основы увеличены в 1,3–1,5 раза в сравнении со стандартными аналогами [5].

Экспериментальные показатели шероховатости поверхности  $Ra$ , мкм при шлифовании ленточным абразивным инструментом с зернами зернистостью от 0,10 до 0,20 мм ориентированными относительно основы на  $90\text{--}160^\circ$  равны. Сами переменные коррелируются с высокой степенью достоверности 99,9%, при этом нет значимых различий между средними значениями нормативных и экспериментальных показателей шероховатости поверхностей образцов, шлифуемых инструментом с ориентированными зернами абразива одного и того же размера. Соответственно, шероховатость поверхности исследуемых образцов в большей степени зависит от размера зерна абразива инструмента нежели от угла ориентирования абразивных зерен в инструменте [5].

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кириенко, А. С. Аспекты формирования рельефа абразивосодержащих поверхностных слоев эластичных инструментов / А.С. Кириенко // Инновационные технологии в машиностроении [Электронный ресурс] : электронный сборник материалов международной научно-технической конференции, посвященной 50-летию Полоцкого гос. ун-та, Новополоцк, 19-20 апреля 2018 г. / Полоцкий государственный университет ; под. ред. чл.-корр., д-ра техн. наук, проф. В.К. Шелега; д-ра техн. наук, проф. Н. Н. Попок. – Новополоцк, 2018. – С. 81–85.

2. Кириенко, А. С. Получение ориентированного рельефа покрытий из абразивосодержащих дисперсных порошков / А.С. Кириенко, С.Э. Завистовский // Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные

покрытия, сварка : материалы 13-й Междунар. научно-техн. конф. (Минск, 16-18 мая 2018 г.) ; ред.кол.: А.Ф. Ильющенко (гл. ред) [и др.]. – Минск : Беларуская навука, 2018. – С. 293–296.

3. Кириенко, А. С. Влияние технологических параметров формирования рабочего слоя инструмента с ориентированными зёрнами на его эксплуатационные характеристики / А.С. Кириенко // Порошковая металлургия: Респ. межвед. сб. науч. тр./ редкол.: А. Ф. Ильющенко [и др.]. - Минск: Беларус. навука, 2018. Вып. 41. – С.257-262.

4. Кириенко, А. С. Инновационные решения в области изготовления эластичных шлифовальных инструментов / А.С. Кириенко, С.Э. Завистовский // Новые технологии и материалы, автоматизация производства: материалы Междунар. научн.-техн. конф., Брест: Издательство БрГТУ, 2019. – С. 83–86



## МОДИФИЦИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ ОФИСНОЙ МАКУЛАТУРЫ

**А.С. КИРИЕНКО**

*Полоцкий государственный университет, Беларусь*

*В статье рассмотрены вопросы решения проблемы накопления офисной макулатуры с помощью персонализированной технологии переработки офисной макулатуры непосредственно в офисах. Представлена технология сухого разрыва бумажного волокна и обоснование целесообразности использования персональной станции переработки офисной макулатуры организациями, имеющими большие обороты бумаги.*

В настоящее время мировые компании повсеместно работают над улучшением и внедрением технологий переработки макулатуры непосредственно вместе ее потребления [1, 2]. На мировом рынке присутствует уже запущенная в производство станция переработки офисной макулатуры от подразделения *PaperLab* компании *Epson*. Данная станция перерабатывает 3,6 кг/ч макулатурного сырья, что является достаточно большим объемом для любого офиса и равно 720 листам формата А4 [3]. Станция снижает затраты на пункты хранения, выброса, заключение договоров со спецавтобазами, предприятиями по переработке отходов, или с третьими лицами сбора макулатуры, которые осуществляют ее вывоз. Также станция решает проблемы экологии, связанные с вредными реагентами (СІ), используемыми для отбеливания бумажного сырья на предприятиях.

Соответственно реализация технологического обеспечения использования персонального и компактного оборудования для экологически чистой переработки макулатуры непосредственно на территории организации-пользователя является актуальной задачей, решение которой позволит снизить или полностью исключить вышеуказанные расходы [4]. Исследования в данной области соответствует приоритетному направлению фундаментальных и прикладных научных исследований Республики Беларусь на 2016 - 2020 годы. Целью исследования, является достижение научно-технического решения задачи по технологическому обеспечению переработки офисной макулатуры непосредственно в самом офисе, в котором должна быть установлена перерабатывающая мини-станция, решающая проблему накопления макулатуры.

Современные аналоги станций переработки офисной макулатуры имеют ряд недостатков таких как:

- высокую стоимость оборудования и технического обслуживания;
- отсутствие опреснительных камер для ликвидации влажного нагретого воздуха из зоны каландрирования, поскольку обильное выделение пара в этой зоне заставляет конденсироваться воду на стенках камеры формования, что негативно сказывается на ее работоспособности;
- отсутствие контроля однородности толщины получаемого бумажного волокна после камеры формования.

Предлагаются следующие направления решения этих проблем:

- упрощение процесса переработки для сокращения времени переработки;
- создание дополнительных систем опреснения воздуха в установке и повторного использования полученной воды [4];
- совершенствование конструкции контроля и регулировки напыления и каландрирования бумажного волокна.
- применение новых недорогих и качественных материалов, которые позволят сократить затраты на обслуживание;
- уменьшение габаритов узлов, что повлияет на себестоимость станции;
- создание производственных линий на территории Республики Беларусь по изготовлению данных установок.

В этой связи работа в данной области является весьма актуальной, значительной для экономики страны, способствующей высвобождению производственных мощностей по складированию, хранению и переработки макулатуры.

Предлагаемое решение реализовано в разработанной конструкции станции, перерабатывающей бумагу, которая занимает малую площадь помещения в сравнении с огромными и грязными цехами по переработке макулатуры [5]. Для данной установки требуется подвод воды и электричества. Предлагаемая конструкция [6] сможет перерабатывать листы формата А4 с чернильными или красящими загрязнениями и формовать новые листы из переработанной массы макулатурного сырья. В процессе переработки в бумагу можно вводить различные материалы, изменяющие ее характеристики такие как цвет, прочность, плотность и огнестойкость.

Решение технологического обеспечения переработки офисной макулатуры видится в создании блочной последовательной электро-механической системы, объединённой в одной компактной конструкции, которая собирается по блочно-модульному принципу для повышения эффективности усовершен-

ствования узлов-модулей, конструирования и производства новых блоков, разборки и сборки, замены, ремонта и последующего технологического обслуживания, замены расходных материалов. Схема разработанной персональной станции переработки макулатуры показана на рисунке 1. Макулатура поступает в приемник 1 после чего разрезается в шредере 2 до мелких частиц нужного размера. Измельченная бумага по трубопроводу поступает в разрывную машину 3 и разрывается на волокна, которые фильтруются в центрифуге. Полученное и отфильтрованное бумажное волокно попадает в формовочную камеру 4, где смачивается и каландрируется группой роликов 6 бумажный лист, который в последующем нарезается на нужный потребителю размер 7.

Все существующие конкурентные технологии переработки макулатуры являются экологически грязными и трудоемкими, наносящими вред окружающей среде и экологии. В настоящее время основным конкурентом в данной технологии является компания Epson Paper Lab. Поэтому в качестве аналога к предлагаемому решению использована запатентованная схема, компании Epson [3].

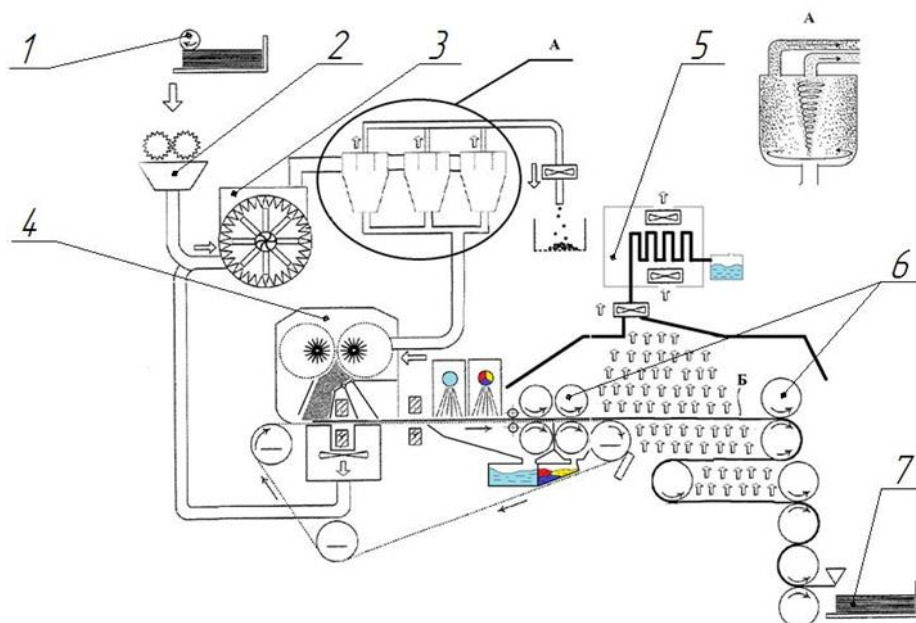


Рисунок 1. – Схема персональной станции переработки офисной макулатуры  
где: А – блок очистки волокна от загрязнений; 1 – блок приема бумаги; 2 – блок разрезания и измельчения бумаги; 3 – блок механического разрыва бумажной массы;  
4 – блок формования; 5 – блок сушки и опреснения влаги; 6 – блок каландрирования;  
7 – блок резки и вывода бумажного листа.

Основываясь на технологии компании Epson и других известных решениях по переработке макулатуры Китайских и Японских компаний нами разработана технология и оборудование, для переработки офисной макулатуры,

которая по расчетным и экспериментальным данным способствует увеличению производительности и качества переработки в 2 раза. Аналогичное производство на территории Республики Беларусь отсутствует, что является одним из положительных факторов развития использования данной инновации. В настоящее время в практическую организационную деятельность компаний все чаще внедряются электронные источники информации, организуются электронные базы документов и информационные офисы, но полный переход на них еще не близок. Поскольку до полного отказа от бумажных носителей информации еще далеко, предлагаемое нами решение вопроса экологически чистой переработки макулатуры на спроектированной станции является актуальной и экономически обоснованной задачей. Особенно это очевидно при огромных оборотах офисной макулатуры.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Фляте, Д. М. Технология бумаги. Учебник для вузов. / Д. М. Фляте. – М: лесн. Промсть, 1988 – 440с.
2. Гавриловец Д. А. Персональная станция переработки офисной макулатуры / Д. А. Гавриловец. // Труды молодых специалистов Полоцкого государственного университета. – 2017.– №: 90 «Машиностроение». – С. 302 – 303.
3. Патент № EP20020004578, 06.11.2002. / Способ получения суспензии целлюлозной массы бумажно-содержащего материала // Патент заявки № EP1254986 A1. 02.05.2001. / Jürgen Dockal-Bauer, Lothar Dr. Pfalzer, Harald Selder. – Режим доступа: <https://www.google.com/patents/EP1254986A1?cl=ru>. Дата доступа: 27.0.2017.
4. Гавриловец Д. А. Совершенствование эффективности блока формования плотности листа персональной станции переработки офисной макулатуры / Д. А. Гавриловец. // Труды молодых специалистов Полоцкого государственного университета. – 2017.– 90 «Машиностроение». – С. 304 – 305.
5. Иванов, С. Н. Технология бумаги. / С. Н. Иванов. – М: лесн. Промсть, 1960 - 712с.
6. Гавриловец Д. А., Кириенко А.С. Разработка технологии и оборудования для переработки офисной макулатуры/ Сборник материалов Международного форума студенческой и учащейся молодежи “Первый шаг в науку – 2017”. ООО "Минский технопарк" – Минск: Четыре четверти, 2017. – с. 82–84.

**АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ И ПРОГРАММНОГО  
ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ  
ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИМИ И ГЕОМЕТРИЧЕСКИМИ  
ПАРАМЕТРАМИ КАЧЕСТВА ПРОДУКЦИИ**

***В.В. ШКУРКО, И.М. ХЕЙФЕЦ***

***Институт подготовки научных кадров НАН Беларуси,***

***Минск, Беларусь***

***Т.А. АЛЕКСЕЕВА***

***Полоцкий государственный университет, Беларусь***

*Рассмотрены специализированные технические средства для управления качеством продукции, включающие приборы с программным обеспечением, предназначенные для определения физико-механических характеристик материала (чаще всего твердости и степени упрочнения), геометрических характеристик поверхностей (шероховатости, волнистости, отклонений профиля) и комплексных характеристик (трибологических и прочностных), описывающих надежность и исчерпание ресурса изделий при износе.*

Управление качеством продукции происходит путем определения контролируемых характеристик продукции датчиками контрольно-измерительных приборов с последующей обработкой цифровой информации программируемыми промышленными контроллерами.

Затем информация поступает для анализа и управления на компьютеры, которые могут интегрироваться в локальную или глобальную сеть и использоваться для удаленного управления или накопления в базах данных с использованием облачных технологий.

Специализированные технические средства для статистического управления качеством продукции включают приборы с программным обеспечением, предназначенные для определения физико-механических характеристик материала, геометрических характеристик поверхностей и комплексных характеристик, описывающих надежность изделий при износе.

**Определение объектов и процессов исследования для управления качеством продукции.** На предприятии прежде всего требуется определить процессы производства, результаты которых не могут быть проверены с помощью последующего мониторинга и измерений. К ним относятся процессы, недостатки которых становятся очевидными только после начала использования продукции.

Поэтому на производстве прежде всего необходимо определить перечень специальных процессов, установить методы их оценки с точки зре-

ния достижения планируемых результатов путем определения требований к оборудованию и персоналу, методики подтверждения качества и управления специальными процессами, используя специализированные методы измерения и контроля, формы и порядок регистрации параметров качества.

### **Твердомеры и микротвердомеры с программным управлением.**

Твердомеры и микротвердомеры – стационарные и переносные приборы, предназначенные для определения физико-механических характеристик поверхностных слоев материалов – твердости различными методами измерений с использованием разнообразных инденторов, при определенных программах нагружений (таблица 1).

Таблица 1. – Описание приборов, используемых методов измерений и программного обеспечения для контроля твердости поверхности

Производители, страна	Измеряемые параметры твёрдости, методы измерений	Приборы (серия)	Программное обеспечение
EMCO-TEST Германия	HB - Бринелля HRA, HRB, HRC - Роквелла HV - Виккерса и Микро-Виккерса	Dura-Vision	ECOS Workflow
QNESS-Hardness Testing Австрия	HB - Бринелля HRA, HRB, HRC- Роквелла HV - Виккерса и Микро-Виккерса, HC - Кнупа	Hardness Testing - Q	Qpix T4
BUEHLER США	HB - Бринелля HRA, HRB, HRC - Роквелла HV - Виккерса и Микро-Виккерса	Wilson - UH	DiaMet
TOKYO-BOEKI Group Япония	HB - Бринелля HRA, HRB, HRC - Роквелла HV - Виккерса и Микро-Виккерса	TOMAS	DiaMet
PCE Instruments Международный холдинг (Германия, Испания, Англия, США, Россия)	HB - Бринелля HRA, HRB, HRC - Роквелла HV - Виккерса и Микро-Виккерса HS –метод отскока по Либу	PCE	PCE
Метротест Россия	HB, HBW - Бринелля HRA, HRB, HRC - Роквелла HRN, HRT - Супер Роквелла HV - Виккерса и Микро-Виккерса HВa - Баркола HA, HD, HОО – Шора HB - Бринелля HRA, HRB, HRC - Роквелла HV - Виккерса	ИТ (измерители твёрдости)  ТП (твердомеры переносные)	М-Test АСУ  М-Test Твердомер

В результате проведенного анализа приборов, используемых методов измерений и программного обеспечения для контроля твердости поверхности можно заключить, что ведущие мировые производители обычно используют свои разработки программного обеспечения, адаптированные под выпускаемые серии приборов.

Однако с учетом наибольшей частоты использования американских стандартов измерения твердости ряд других производителей использует программное обеспечение DiaMet фирмы разработчика BUEHLER (США).

**Профилометры, профилографы и контурографы с программным управлением.** Для измерения геометрических характеристик поверхности изделия используются различные приборы в стационарном и переносном исполнении.

Контроль шероховатости и волнистости поверхности в зависимости от численного или графического представления результатов измерений проводят с помощью профилометров или профилографов, а также профилометров-профилографов. Контроль различных отклонений профиля поверхности изделия проводят контурографом или комбинированным прибором.

Анализ характеристик приборов и программного обеспечения для контроля геометрических параметров качества поверхности от ведущих мировых производителей показывает, что только для стационарных приборов используется совместимое с Windows внешнее программное обеспечение, чаще всего системы типа FORMTRACEPAK – 6000 на базе SurfaceXplorer.

Для переносных приборов применяются встроенное программное обеспечение, поставляемое в комплекте на дисках или распространяемое по сети.

**Трибометры и машины трения с программным управлением.** Трибометры и машины трения – контрольно-измерительное оборудование, предназначенное для исследования трибологических характеристик поверхностей и определения износа поверхностных слоев материалов изделий при различных схемах контактного нагружения пар трения.

Наиболее распространённое программное обеспечение для стационарных машин – Tribox на базе Windows.

## ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДИФФУЗИОННО-ЛЕГИРОВАННОЙ ПРОВОЛОКИ

**М.В. СЕМЕНЧЕНКО**

*Полоцкий государственный университет, Беларусь*

*Показана перспективность технологии изготовления диффузионно-легированной проволоки посредством электроконтактного нагрева в режиме термоциклирования в порошковой смеси. Предложен способ получения экономно-легированной проволоки и установка для его реализации.*

Формирование защитных покрытий методом наплавки или напыления предполагает использование проволочного материала с подходящим химическим составом. От легирующих элементов напрямую зависят характеристики сформированного слоя и возможность эксплуатации детали в определенных условиях.

Производители предлагают высоколегированную проволоку, отличающуюся высокой стоимостью, что делает экономически невыгодным ее использование при упрочнении или восстановлении дешевых малоресурсных деталей. Кроме того, большинство предприятий не имеет финансовой возможности для приобретения проволоки различных марок, предназначенных для защиты поверхностей, работающих в конкретных условиях. С учетом этого представляется перспективной разработка технологии изготовления диффузионно-легированной проволоки с оптимальным химическим составом [1]. Ее реализация позволяет отказаться от закупки широкой номенклатуры легированных материалов.

Учитывая трудоемкость диффузионного насыщения в условиях печного нагрева [2], представляется перспективной разработка технологии изготовления диффузионно-легированной проволоки путем электроконтактного нагрева в режиме термоциклирования. Нами предложен способ диффузионного насыщения стальной проволоки [3], позволяющий получить диффузионно-легированную проволоку на специально разработанной установке [4]. Непрерывная подача проволочного материала в зону обработки позволяет насытить поверхностный слой проволочного материала различной протяженности за ограниченное время.



Ток пропускается по проволоке с длительностью импульса 0–10 секунд и длительностью паузы 1–3 секунд, время обработки каждого микрообъема проволоки составляет 2–4 минуты [3,5]. Проволока подается в зону обработки непрерывно с заданной постоянной скоростью. Температура материала в процессе обработки меняется по заранее заданному закону (рис.1).

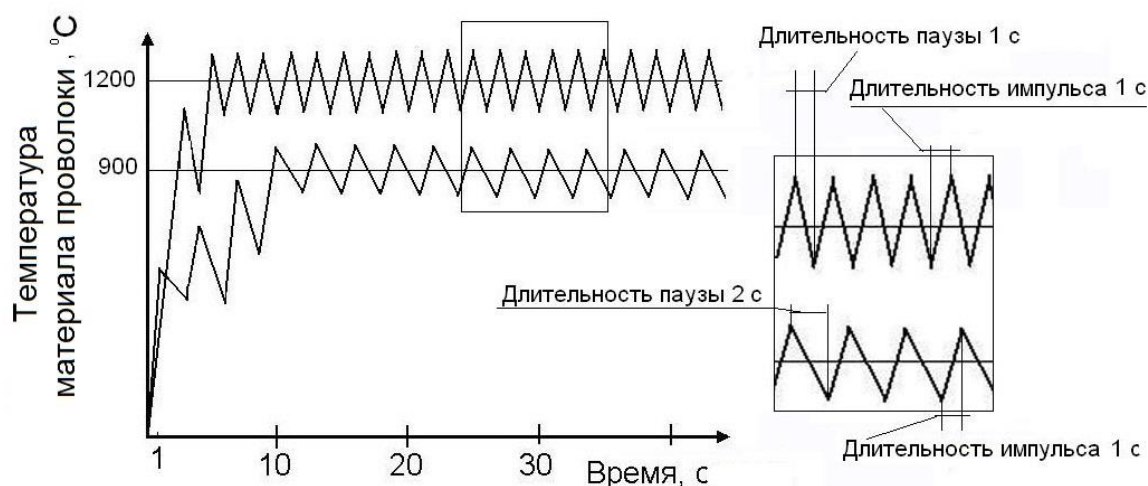


Рисунок 1. – Схема изменения температуры проволоки в процессе обработки

Борирование выполнялось в порошке ферробора ФБ 17 (FeB17) (ГОСТ 14848-69), титанирование – в порошке ферротитана ФТи 35 (ГОСТ 4761-91). В качестве основного материала была выбрана проволока Св08Г1С, которая непрерывно подавалась в зону обработки со скоростью 0,1 м/мин. Режим термоциклирования выбирался с учетом технологических особенностей выполняемой обработки [6].

Проведенные исследования показали перспективность использования технологии, реализуемой путем совмещения электроконтактного нагрева и термоциклирования, для изготовления диффузионно-легированной проволоки с оптимальным химическим составом. Для изменения химического состава проволочного материала требуется правильный подбор насыщающей среды и режима термического воздействия.

В качестве насыщающей среды следует использовать порошки чистых металлов, либо порошки химических веществ, из которых выделение активных атомов легирующего элемента не требует длительного времени и высокой температуры. Имеет значение фракционный состав. Для борирования стальной проволоки рекомендуется применять насыщающую среду с размером частиц от 63 до 160 мкм.

Технология позволяет интенсифицировать процесс диффузионного насыщения стальной проволоки. С ее помощью можно получить проволоочный материал требуемого химического состава любой протяженности за ограниченное время.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Семенченко, М.В. Диффузионное насыщение стальной проволоки в условиях электроконтактного нагрева в режиме термоциклирования / М.В. Семенченко // Тенденции развития науки и образования. – Самара, ИП Иванов Вячеслав Иванович, 2017. – №32-4. – С. 60 – 61;
2. Борисенок, Г.В. Химико-термическая обработка металлов и сплавов / Г.В. Борисенок, Л.А. Васильев, Л.Г.Ворошнин и др.– М., Металлургия, 1981, 424 с.
3. Способ диффузионного насыщения стальной проволоки: Патент на изобретение № 13370 МПК (2009) С 23С 8/00, С 23С 10/00, С 23D 1/34 – В.М. Константинов, М.В. Семенченко, В.Г. Дашкевич, А.С. Губанов; заявитель УО «Полоц. гос. ун-т» № а 20080742 заявл. 05.06.08., Опубл. 30.06.2010;
4. Установка для электротермической обработки проволоки: Патент на полезную модель № 696 МПК 7 С21D 1/40 – В.М. Константинов, А.С. Губанов, С.Н. Абраменко, М.В. Семенченко; заявитель УО «Полоц. гос. ун-т» № и 20020065; заявл. 05.03.02., Опубл. 30.12.02
5. Семенченко, М.В.Повышение производительности диффузионного насыщения проволоки путем электроконтактного нагрева в режиме термоциклирования / Семенченко М.В. // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В: Промышленность. Прикладные науки. 2018. № 11. С. 78-82.
6. Семенченко, М.В. Технологические особенности электроконтактной обработки в режиме термоциклирования / М.В. Семенченко // Инновационные технологии в машиностроении: материалы международной научно-технической конференции, посвященной 100-летию академика П. И. Ящерицына и 40-летию машиностроительного факультета ПГУ. Под общей редакцией А. И. Гордиенко, В. К. Шелега. (г.Новополоцк, 28 – 29 октября 2015) / Учреждение образования «Полоцкий государственный университет». – Новополоцк, 2015. – С. 181-183.

## УСТАНОВКА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ДИФФУЗИОННО-ЛЕГИРОВАННОЙ ПРОВОЛОКИ

**М.В. СЕМЕНЧЕНКО**

*Полоцкий государственный университет, Беларусь*

*Показана перспективность диффузионного насыщения стальной проволоки, предназначенной для формирования защитных покрытий. Разработана установка, позволяющая реализовать процесс путем электроконтактного нагрева в режиме термоциклирования.*

Проволочный материал, используемые для формирования защитного покрытия посредством наплавки или напыления должен обладать определенными химическим составом. Вид и процентное содержание легирующих элементов зависит от условий эксплуатации защищаемой поверхности. Высокая стоимость порошковой проволоки и других сложнолегированных материалов делает перспективным получение диффузионно-легированной проволоки с оптимальным химическим составом [1]. Кроме того, предлагаемые производителями составы, как правило, унифицированы и могут одновременно использоваться для решения достаточно большого спектра задач. При использовании технологии диффузионного насыщения становится возможным изготовление небольших партий проволочного материала с учетом преследуемых целей. В качестве основы может использоваться углеродистая проволока с процентным содержанием углерода около 0,08%.

Учитывая трудоемкость диффузионного насыщения в условиях печного нагрева [2], нами был предложен способ диффузионного насыщения стальной проволоки [3] путем электроконтактного нагрева в режиме термоциклирования. Под электроконтактным нагревом понимается технологический процесс сквозного нагрева металла за счет тепловой энергии протекающего по металлу электрического тока [4]. Способ позволяет повысить производительность процесса диффузионного насыщения стальной проволоки различного диаметра. Осуществляется непрерывно.

Для реализации способа разработана установка [5], позволяющая получать диффузионно-легированную проволоку с различным химическим составом. Установка (рис.1) состоит из трансформатора 1; контейнера с насыщающей смесью 2; токопроводящих роликов 3; блока управляющих импульсов 4; регулятора 5.

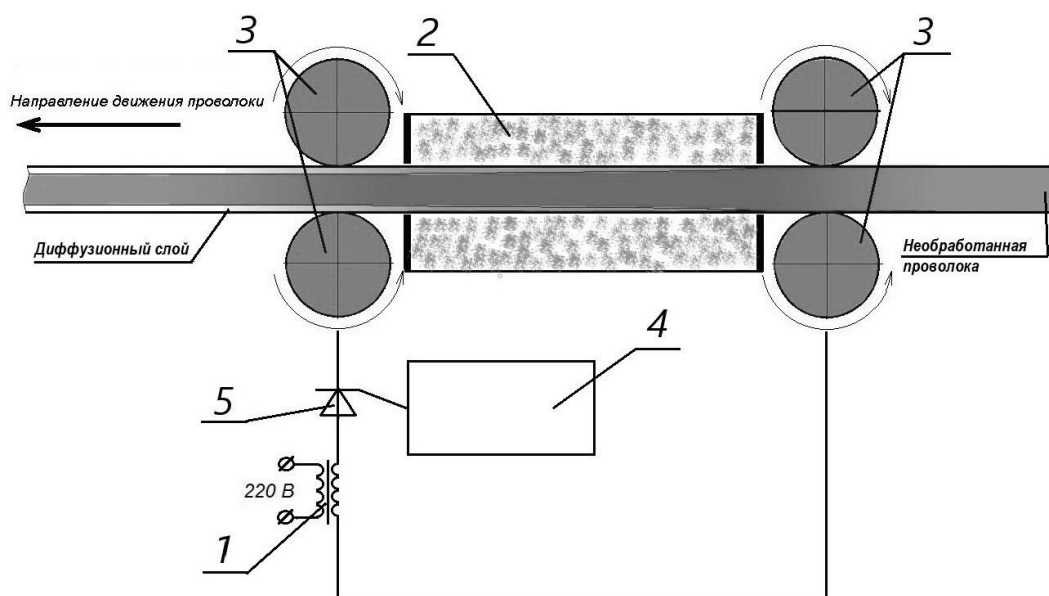


Рисунок 1. – Схема лабораторной установки для диффузионного насыщения проволоки

Работает установка следующим образом: необработанная проволока проходит контейнер 2 с насыщающей смесью со скоростью  $V=0\ldots0.1$  м/мин. К токопроводящим роликам 3 подается электрический ток от трансформатора 1. Блок управляющих импульсов 4 через регулятор 5 обеспечивает реализацию режима термоциклирования. Электрический ток пропускают через проволоку циклически с длительностью импульса 0,1 – 10 секунд и длительностью паузы 0,1 – 10 секунд. Сила тока меняется от 15 до 30 А, напряжение составляет 16,8 В.

Нами выполнялось борирование в порошке ферробора ФБ 17 (FeB17) (ГОСТ 14848-69), титанирование – в порошке ферротитана ФТи 35 (ГОСТ 4761-91). В качестве основного материала была выбрана проволока Св08Г1С, которая непрерывно подавалась в зону обработки со скоростью 0,1 м/мин. Режим термоциклирования выбирался с учетом технологических особенностей выполняемой обработки [6].

Проведенные исследования показали перспективность использования разработанной установки для получения диффузионно-легированной проволоки для термической обработки длинномерного проволочного материала.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Семенченко, М.В. Диффузионное насыщение стальной проволоки в условиях электроконтактного нагрева в режиме термоциклирования / М.В. Семенченко //

Тенденции развития науки и образования. – Самара, ИП Иванов Вячеслав Иванович, 2017. – №32-4. – С. 60 – 61;

2. Борисенок, Г.В. Химико-термическая обработка металлов и сплавов / Г.В. Борисенок, Л.А. Васильев, Л.Г.Ворошнин и др.– М., Металлургия, 1981, 424 с.

3. Способ диффузионного насыщения стальной проволоки: Патент на изобретений № 13370 МПК (2009) С 23С 8/00, С 23С 10/00, С 23D 1/34 – В.М. Константинов, М.В. Семенченко, В.Г. Дашкевич, А.С. Губанов; заявитель УО «Полоц. гос. ун-т» № а 20080742 заявл. 05.06.08., Оpubл. 30.06.2010;

4. Романов, Д.И. Электроконтактный нагрев металлов/ Д.И.Романов // 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1981. 168 с.

5. Установка для электротермической обработки проволоки: Патент на полезную модель № 696 МПК 7 С21D 1/40 – В.М. Константинов, А.С. Губанов, С.Н. Абраменко, М.В. Семенченко; заявитель УО «Полоц. гос. ун-т» № и 20020065; заявл. 05.03.02., Оpubл. 30.12.02

6. Семенченко, М.В. Технологические особенности электроконтактной обработки в режиме термоциклирования / М.В. Семенченко // Инновационные технологии в машиностроении: материалы международной научно-технической конференции, посвященной 100-летию академика П. И. Ящерицына и 40-летию машиностроительного факультета ПГУ. Под общей редакцией А. И. Гордиенко, В. К. Шелега. (г.Новополоцк, 28 – 29 октября 2015) / Учреждение образования «Полоцкий государственный университет». – Новополоцк, 2015. – С. 181-183.

**ОБОСНОВАНИЕ РЕНТАБЕЛЬНОСТИ РЕМОНТА  
АВТОМОБИЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ**

**В.П. ИВАНОВ, Т.В. ВИГЕРИНА**

*Полоцкий государственный университет, Беларусь*

*Поддержание автомобильного парка в технически исправном состоянии при эксплуатации состоит из воздействий двух видов: технического обслуживания и ремонта. Воздействия первого вида направлены на уменьшение интенсивности разрушительных процессов по мере использования автомобилей своевременным выявлением и экономически эффективным предупреждением неисправностей в плановом порядке.*

Наиболее сложным и трудоемким видом ремонта является капитальный ремонт, при котором устраняются любые неисправности с полным восстановлением ресурса. В настоящее время капитальный ремонт техники сводится к ремонту агрегатов и заключается в экономически эффективном восстановлении их надежности в результате наиболее полного использования остаточной долговечности деталей [1].

Практика показывает, что научно обоснованные процессы и организация ремонта машин позволяют достичь нормативной наработки техники, а в отдельных случаях и превзойти наработку новых изделий.

Восстановление деталей позволяет использовать их материал, форму и остаточную долговечность, что сокращает потребление запасных частей, энергии и материалов, а также способствует охране окружающей среды (масса отходов при восстановлении деталей в 20 раз меньшая, чем при их изготовлении). Только за счет исключения металлургического процесса при восстановлении одной тонны стальных деталей экономят 180 кВт·ч электроэнергии, 0,8 т угля, 0,8 т известняка и 175 м<sup>3</sup> природного газа [1]. Таким образом, использование восстановленных деталей при ремонте агрегатов является актуальным, эффективным и ресурсосберегающим мероприятием.

Цель работы – обоснование рентабельности ремонта автомобильных агрегатов с применением восстановленных деталей.

Обоснование рентабельности основывалось на учете количественно изменяющихся статей затрат на технологические операции ремонта автомобильных агрегатов в различных вариантах. Ограничениями решений являлось обеспечение нормативной послеремонтной наработки отремонтированных агрегатов, обусловленной наработкой составляющих деталей. Объект исследования являлись автомобильные агрегаты (двигатели ведущие мосты и коробки передач).

Восстанавливаемые детали агрегатов утрачивают работоспособность в большинстве случаев из-за незначительного износа небольшого числа поверхностей (потеря массы деталей при этом составляет до 0,3 %). При восстановлении деталей обрабатывают только около 25 % числа поверхностей, обрабатываемых при их изготовлении. Затраты на материалы при изготовлении деталей составляют 30–40 % общих затрат, а при их восстановлении 6–7 % от себестоимости соответствующих процессов [2]. Если эти затраты сопоставить непосредственно, то окажется, что материальные затраты при восстановлении деталей составят лишь 3 % от соответствующих затрат при их изготовлении. Создание ремонтных заготовок пластическим деформированием материала, электромеханической обработкой или обработкой под ремонтные размеры вообще не требует расхода материалов.

Затраты на восстановление деталей зависят от количества и видов устраняемых повреждений. При первом обращении на восстановление, как правило, обходятся без трудоемкого нанесения восстановительных покрытий, поэтому стоимость восстановления минимальная (таблица). Последующее обращение, связанное с нанесением таких покрытий, в 1,5–2,0 раза увеличивает соответствующие затраты.

Современное состояние науки и практики позволяет повысить наработку восстановленных деталей до нормативного значения, но некоторые детали нерационально восстанавливать централизованно, потому что даже в условиях значительной концентрации производства на специализированных предприятиях невозможно обеспечить себестоимость восстановления, которая не меньше затрат на изготовление детали. На заводе по капитальному ремонту машин следует сохранить восстановление простых деталей, имеющих низкую стоимость изготовления, но в результате изнашивания которых приходится восстанавливать значительную (более 100 см<sup>2</sup>) рабочую поверхность. Это – валы и оси шестерен масляных насосов, валики и оси педалей, оси блоков шестерен, штоки переключения скоростей, крышки подшипников и др.

Таблица. – Отношение затрат  $Z_{в.д}$  на восстановление основных деталей двигателей к цене новых деталей  $C_{н.д}$

Деталь	Основные восстановительные операции	$Z_{в.д}/C_{н.д}$
Блок цилиндров	Развертывание отверстий под толкатели, шлифование стыков крышек коренных опор, хонингование опор	0,20–0,30
	Развертывание отверстий под толкатели, наплавка (напыление) и растачивание коренных опор	0,30–0,50
Головка цилиндров	Замена втулок клапанов, их развертывание	0,15–0,20
Гильза цилиндра	Растачивание и хонингование под ремонтный размер	0,10–0,15
	Установка листовой дополнительной ремонтной детали, хонингование под номинальный размер	0,25–0,30
Поршень	Шлифование юбки, развертывание отверстия под поршневой палец, нанесение оловянного покрытия	0,10–0,30
Поршневой палец	Термопластическая раздача, шлифование	0,20–0,25
	Хромирование, шлифование	0,30–0,45
Шатун	Замена втулки, железнение поверхности нижней головки, обработка резанием поверхностей отверстий	0,40–0,60
Коленчатый вал	Шлифование и полирование шеек под ремонтные размеры	0,08–0,15
	Наплавка (напыление) шеек, их точение, шлифование и полирование под номинальные размеры	0,35–0,50
Вкладыши коленчатого вала	Растачивание под предыдущий ремонтный (номинальный) размер	0,10–0,15
Распределительный вал	Шлифование шеек под ремонтные размеры и кулачков «как чисто»	0,08–0,12
	Наплавка шеек и их шлифование под номинальные размеры, газопламенная наплавка кулачков и их шлифование	0,35–0,45

В рамках одного ремонтного завода следует выделять участки восстановления деталей, взятых с комплексных участков ремонта отдельных агрегатов. Производительность труда на таких участках в 1,5–1,8 раза выше, а себестоимость на 20–30 % ниже, чем на комплексных.

Обоснована рентабельность восстановления изношенных деталей с достижением послеремонтной наработки агрегатов, включающих эти детали, не уступающих наработке до предельного состояния новых агрегатов. Стоимость восстановления отдельных деталей составляет 8–60 % от цены новых изделий.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Восстановление и упрочнение деталей, 2013, (под. ред. Ф.И. Пантелеенко), Издательство «Наука и технология», Москва.
2. Иванов В.П. Обеспечение нормативной послеремонтной надежности коленчатых валов, Инновации в отрасли народного хозяйства, как фактор решения социально-экономических проблем современности, 2015, Институт непрерывного образования, Москва.



## СРАВНИТЕЛЬНАЯ СТОЙКОСТЬ КОМБИНИРОВАННЫХ ПОКРЫТИЙ

*Н.Н. ПОПОК, В.С. АНИСИМОВ, Д.А. БАШЛАЧЁВ, Е.В. ПУЙМАН*

*Полоцкий государственный университет, Беларусь*

*В.А. КУКАРЕКО*

*Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси,*

*Минск, Беларусь*

В связи с постоянным увеличением действующих нагрузок, скоростей, рабочих температур и применением агрессивных сред повышение стойкости деталей машин становится всё более актуальным. Одним из наиболее перспективным направлением решением этой проблемы является инженерия поверхностных слоёв материала путём формирования регулярного микрорельефа и нанесения покрытий газотермическим и вакуумным ионно-плазменными методами.

Предлагаемый механизм формирования комбинированного покрытия включает получение регулярного микрорельефа поверхности основы с высотой неровности не более  $R_a$  0,63-1,2 мкм с помощью лезвийной обработки на высокой скорости резания порядка 5-10 м/с, что исключает недостатки шлифования – низкую производительность и шаржирования поверхности абразивными частицами. Затем с использованием газотермического метода наносится покрытие из материалов различной твёрдости, что создаёт «мягкую» основу во впадинах неровностей и повышенную твёрдость вершин микронеровностей. Это покрытие вновь обрабатывается лезвийным инструментом и его поверхность доводится до минимально возможной шероховатости. Потом на эту поверхность наносится тонко плёночное покрытие из тугоплавкого металла вакуумным ионно-плазменным методом, что ещё более повышает твёрдость вершин неровностей. Таким образом, создаётся комбинированное покрытие, имеющее высокую твёрдость и прочность, а также обладающее хорошими смазывающими свойствами, что должно обеспечить повышение стойкости деталей машин.

Исследование стойкости комбинированного покрытия на деталях машин проводилось в два этапа. На первом этапе исследовались группы образцов из стали 40Х и 12Х18Н10Т с покрытием из стали 20Н80 и инструментальной стали 95Х18, нанесенных газотермическим методом, и по-

крытием из нитрида титана, нанесённым вакуумным и ионно-плазменным методом. На втором этапе исследовались группы образцов из тех же марок сталей, что и на первом этапе, но газотермическое покрытие включало материал «бронза–сталь».

Методикой исследований предусматривалось определение микроструктуры газотермического покрытия на оптическом микроскопе АЛЪТАМИ МЕТ 1МТ, рентгеновская съёмка поверхности на дифрактометре ДРОН-2, измерение коэффициента трения и износа образцов с использованием машины трения модели МТ-393 и аналитических весов модели ВК-1500, измерение шероховатости поверхности профилографом-профилометром модели «Abris», твёрдости и микротвёрдости образцов на приборе Darascan 20. Внешний вид используемого в исследованиях оборудования и образцов предоставлен на рисунке 1.

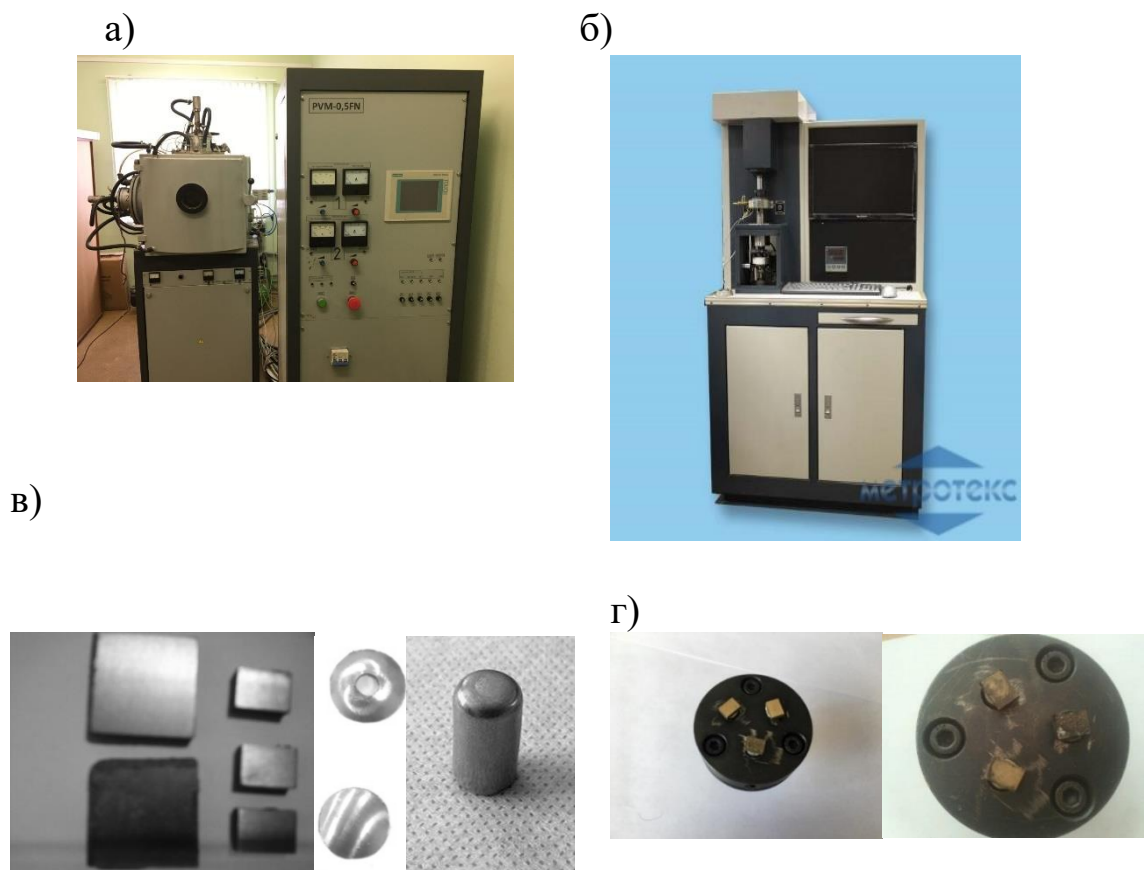


Рисунок 1. – Внешний вид ионно-лучевой установки (а), машины трения (б), образцов первой, второй и третьей групп (в), образцов до и после испытания (г)

Микроструктура покрытия из стали 95Х18 содержит перемеживающиеся прослойки металла и оксидов порядка 25 об.%, пористость покры-

тия не превышает 3% (рис.2а). На рентгенограммах комбинированного покрытия зафиксированы фазы TiN,  $\gamma$ -Fe,  $\alpha$ -Fe,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , FeO (рис.2,б), причём отмечено существенное уменьшение  $\gamma$ -фазы в связи с  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращением при нанесении покрытия из нитрида титана.

б)

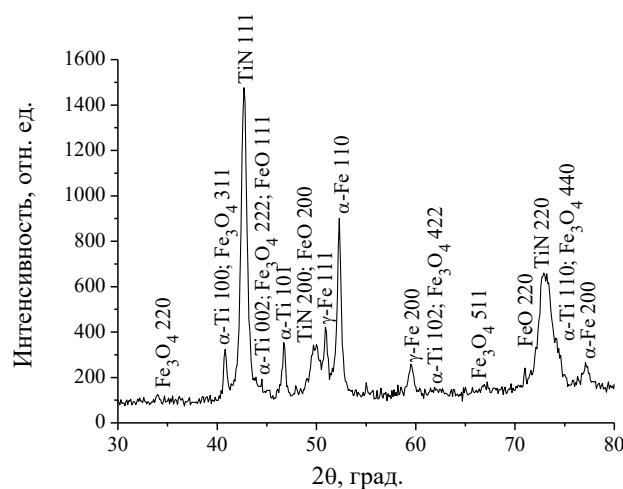
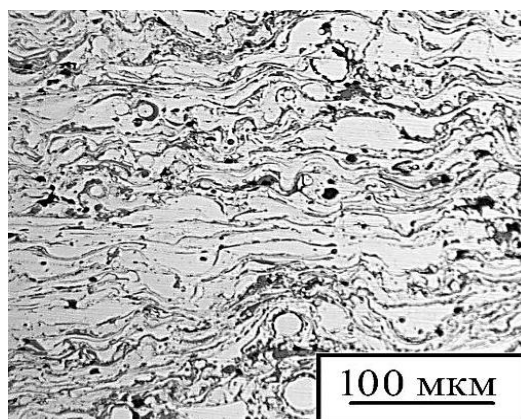


Рисунок 2. – Микроструктура газотермического покрытия из проволочной стали 95X18 (а) и фрагмент рентгеновской дифрактограммы (CoK $\alpha$ ) покрытия из стали 95X18 и нитрида титана (б)

Установлено, что нанесение на поверхность образцов регулярного микрорельефа и покрытия из нитрида титана обеспечивает повышение микротвёрдости в среднем на 100 HV0,01 по сравнению с основой. При этом шероховатость поверхности снижается до 10 раз.

Характер изменения зависимости коэффициента трения от времени испытаний примерно одинаков для различных составов покрытий: в начале на этапе притирания коэффициент трения возрастает до значений 0,2-0,32 и затем его значение стабилизируется; причём значение коэффициента трения тем больше, чем больше усилие прижима образца и контртела (быстрорежущая сталь Р6М5), снижению коэффициента трения способствует введение в состав покрытия нитрида титана и сплава «бронза-сталь», что связано со снижением шероховатости поверхности и смазывающим эффектом «бронза-стального» покрытия.

Комбинированное покрытие из инструментальной стали 95Х18 и TiN обеспечивает снижение износа упрочнённых образцов на 30-50% по сравнению с образцом из стали 12Х18Н10Т с покрытием TiN. Введение в состав покрытия сплава «бронза-сталь» и TiN обеспечивает снижение износа образцов по сравнению с не упрочнёнными образцами.

Исследование коррозионного износа комбинированного покрытия в 45% растворе плавиковой кислоты показало, что коррозионная стойкость образцов из стали 12Х18Н10Т с покрытием TiN увеличивается в 1,7-2 раза по сравнению с другими образцами. Введение в состав покрытия сплава «бронза-сталь» не способствует повышению коррозионной стойкости образцов.

В результате проведенных исследований можно рекомендовать комбинированное покрытие из инструментальной стали 95Х18 и TiN для упрочнения тяжело нагруженных деталей, работающих в агрессивных средах, а введение в состав комбинированного покрытия сплав «бронза-сталь» обеспечивает повышение работоспособности узлов трения.

## ОСОБЕННОСТИ ИЗНАШИВАНИЯ ЭЛАСТОМЕРОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МАНЖЕТ БУРОВОГО НАСОСА

**М.Ю. КОДНЯНКО, Н.А. ВЫСОЦКАЯ, А.А. ДУБОВСКИЙ**  
*Солигорский Институт проблем ресурсосбережения  
с Опытным производством, Беларусь*

*Исследованию причин отказов буровых насосов посвящено значительное число работ, по результатам которых произведены различные технические усовершенствования деталей гидравлической части. Согласно результатам, особенно низкой наработкой на отказ обладают клапаны и манжеты, устанавливаемые на поршни в цилиндрической группе. Высокая изнашиваемость связана с тем, что растворы имеют большие вязкость и статическое сопротивление сдвигу.*

*Таким образом, целью работы является исследование износостойкости материала, применяемого для изготовления манжет.*

**Введение.** Современные буровые насосы характеризуются большой надежностью. Все основные узлы трения работают в режиме принудительной смазки, так что в большинстве случаев основному износу подвергаются детали, непосредственно контактирующие с буровым раствором.

Так, к наиболее изнашиваемым деталям насоса можно отнести манжеты, устанавливаемые на поршни. На данный момент манжеты изготавливают из резины марки ИРП-1297 ТУ 26-20-1088-88. Данная резиновая смесь обладает повышенной износостойкостью, повышенной твердостью (65-95 ShA), маслостойкостью, способна работать в среде воды и воздуха при температурах -20...+100 °С.

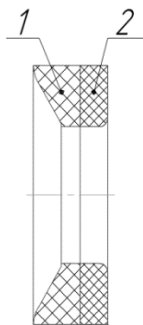


Рисунок 1. – Манжета: 1 – резина группы 1 ИРП–1293; 2 – ткань капроновая

Буровые насосы предназначены для выполнения следующих операций:

- нагнетание в скважину промывочной жидкости с целью очистки забоя от выбуренной породы и выноса ее на поверхность;
- создание гидромониторного эффекта при бурении струйными долотами;
- приведение в действие забойных гидравлических двигателей.

Так как разработки нефтяных и газовых месторождений проводятся практически во всех географических широтах, буровые насосы эксплуатируются в различных климатических условиях при температуре воздуха до  $\pm 50^\circ\text{C}$ .

На данный момент, манжеты изготавливают из смеси резиновой ИРП-1293 ТУ 26-02-1088-88. Изделия изготовленные из резины данной марки обладают повышенной износостойкостью, масло-бензостойкостью и могут эксплуатироваться при температуре  $T = -20 \dots +100^\circ\text{C}$ . Твердость по Шору «А» этой резиновой смеси составляет 65...95 единиц. Манжета является деталью цилиндровой группы, изображенной на рисунке 2.

Таким образом, изнашивание манжеты при работе насоса обусловлено следующими факторами:

1. Высокая химическая активность рабочей среды. В буровом растворе могут присутствовать нефтепродукты и химические реагенты, способные изменять кислотность бурового раствора от кислого до щелочного. Это означает, что буровой раствор можно отнести к физически и химически агрессивным средам. Воздействие активных сред приводит к вымыванию из полимеров пластификаторов, стабилизаторов и других компонентов, набуханию, изменению физико-механических показателей [1].

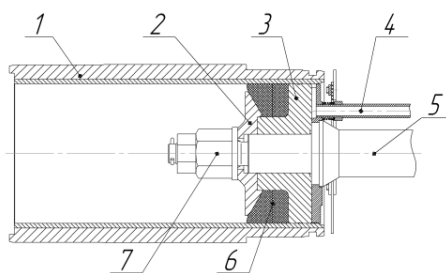


Рисунок 2. – Цилиндровая группа: 1 – втулка цилиндровая; 2 – шайба; 3 – сердечник; 4 – подвод СОЖ; 5 – шток поршня; 6 – манжета поршня; 7 – гайка крепления поршня

2. Гидроабразивное изнашивание. В буровом растворе может содержаться до 40 % твердых частиц, которые, при рассмотрении механизма изнашивания манжеты, выполняют роль абразива. При всасывании насосом бурового раствора, создается поток жидкости, в котором частицы абразива ударяются о поверхность манжеты, изнашивая ее.

3. Изнашивание в среде незакрепленного абразива. При нагнетании давления насосом поршень толкает буровой раствор. При этом частицы абразива находящиеся в растворе могут попасть в пространство между манжетой и цилиндровой втулкой, изнашивая боковые поверхности манжеты.

4. Усталостное изнашивание. Поршень во время работы совершает возвратно-поступательные движения, при этом на манжету действуют знакопеременные нагрузки, что приводит к ее усталостному изнашиванию.

5. Влияние температуры. Известно, что температура бурового раствора, поступающего на прием насоса  $T = 35...60$  °С. Такая температура незначительно влияет на изнашивание манжеты. Однако при движении манжеты по цилиндровой втулке реализуется граничное трение. Температура вспышки при этом может достигать высоких значений. Она может привести к термодеструкции материала манжеты, даже несмотря на механизм охлаждения.

Эффективное повышение износостойкости резиновых изделий не может быть достигнуто без выяснения механизма износа; знание его позволяет установить зависимость износостойкости резины от ее свойств и, таким образом, прогнозировать работоспособность изделий в условиях эксплуатации, а также разрабатывать методы определения износостойкости и принципы построения рецептур резин. Износ резин происходит по различным механизмам; в настоящее время сложились представления о трех механизмах износа резин, соответствующих некоторым идеализированным предельным режимам: абразивному, усталостному и механизму износа посредством «скатывания» [1; 2; 3; 4; 5].

**Абразивный износ.** Этот вид износа реализуется при трении резины по шероховатым поверхностям при относительно высоком значении коэффициента трения. Характерным для абразивного износа является наличие на истертой поверхности резин параллельных полос (царапин), направление которых совпадает с направлением скольжения.

Установлено, что на мягкой резине ячейки раздира более глубокие и расположены на достаточно большом и приблизительно равном расстоянии друг от друга. С увеличением твердости резины вследствие уменьшения упругих деформаций ячейки раздира сближаются, и это сближение происходит до тех пор, пока не образуется сплошная борозда.

При трении резины по грубым твердым поверхностям без изменения направления движения часто можно наблюдать на поверхности образца образование параллельных гребней, расположенных под прямым углом к направлению движения.

**Износ посредством «скатывания».** При изучении особенностей истирания резины при трении по относительно гладким поверхностям удалось установить новый, специфичный для высокоэластичных материалов механизм истирания, названный износом посредством «скатывания» [3; 4]. Этот вид износа реализуется при относительно высоком значении коэффициента трения между резиной и истирающей поверхностью.

**Усталостный износ.** Рассмотренные выше два вида износа – абразивный и посредством «скатывания» – являются высокоинтенсивными видами износа; если они реализуются, то изделия оказываются недолговечными. В реальных узлах трения преобладает наименее интенсивный вид износа, названный усталостным износом. Это наиболее распространенный вид износа резин. Он осуществляется при относительно небольшой силе трения между резиной и истирающей поверхностью и при сравнительно невысоких контактных напряжениях на неровностях твердой шероховатой опоры. Разрушение поверхностного слоя резины в зоне контакта происходит в результате многократных деформаций. Число циклов до разрушения является функцией усталостной выносливости резины и напряженного состояния, зависящего от давления, скорости, геометрии истирающей поверхности и других факторов.

**Заключение.** В данной работе были рассмотрены механизмы изнашивания резиновых манжет: абразивный износ, усталостный износ и износ посредством «скатывания». Для увеличения износостойкости манжет предложено заменить резиновую смесь на полиуретан. В дальнейшем будут проведены исследования на износостойкость в водной и масляной рабочих средах эластомеров с различной твердостью.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ильский, А.Л. Расчет и конструирование бурового оборудования : учеб. пособие для ВУЗов / А.Л. Ильский, Ю.В. Миронов, А.Г. Чернобыльский. - М.: Недра, 1985. - 452 с.
2. Назаров, В.Г. Моделирование процессов трения скольжения в паре поверхностью и объемно модифицированный эластомер-металл / В. Г. Назаров [и др.] // Перспективные материалы. – 2009. – № 4. – С. 85.
3. Богданович, П.Н. Трение, смазка и износ в машинах : учебник / П.Н. Богданович, В.Я. Прушак, С.П. Богданович. – Минск : Тэхналогія, 2011. – 527 с.
4. Бродский, С.Г. Дegradaция гидравлических насосов и моторов при абразивном износе полидисперсным загрязнителем / Г.С. Бродский // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2006 – С. 51–57.
5. Мышкин, Н.К. Трибология полимеров адгезия, трение, изнашивание и фрикционный перенос. / Н.К. Мышкин, М.И. Петроковец, А.В. Ковалев // Трение и износ. – 2006. – С. 429–443.



## **ВЛИЯНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И СБОРКИ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЕРЕДАЧ ЭКСЦЕНТРИКОВОГО ТИПА**

***П.Н. ГРОМЫКО, С.Н. ХАТЕТОВСКИЙ***

***Белорусско-Российский университет, Могилев, Беларусь***

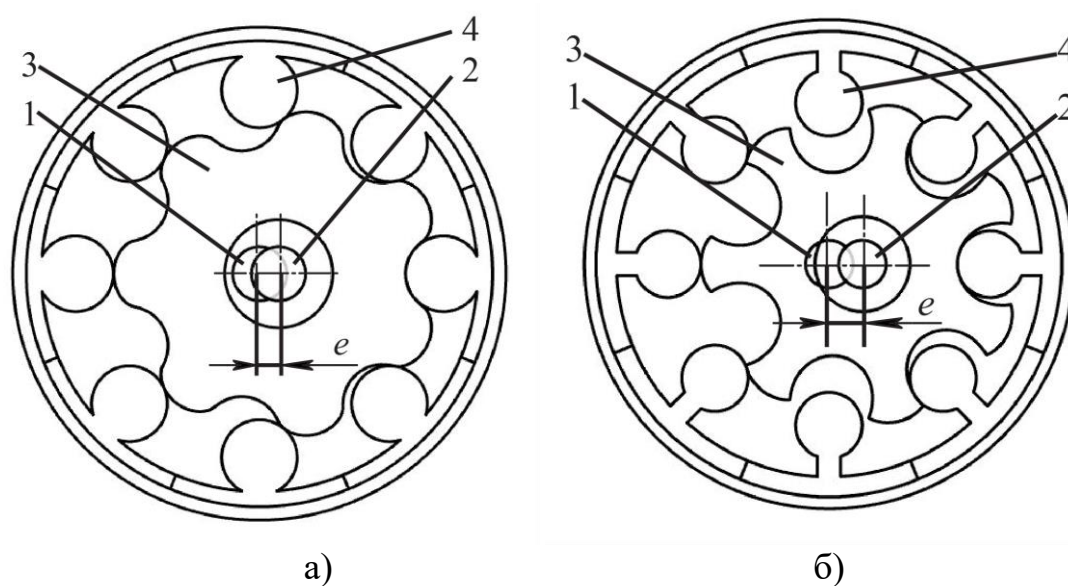
*В работе рассматривается влияние погрешностей изготовления и сборки звеньев двух вариантов эксцентриковой передачи на такие эксплуатационные характеристики, как коэффициент полезного действия и кинематическая погрешность. Варианты эксцентриковой передачи различаются формой зубьев сателлита, которые получены в результате перемещения ролика - зуба производящего колеса – по укороченной и удлиненной эпициклоиде.*

Передачи эксцентрикового типа относятся к передачам, на основе которых возможно создание компактных, малогабаритных конструкций приводных устройств [1]. При этом высокие эксплуатационные характеристики эксцентриковых передач достигаются, как правило, за счет высокой точности изготовления и сборки звеньев, что приводит к повышению себестоимости изготовления и организации специального производства.

Различные виды механических передач по-разному реагируют на погрешности изготовления и сборки звеньев. У одних механических передач небольшое увеличение погрешностей приводит к резкому ухудшению эксплуатационных характеристик. Другие способны сохранять высокий уровень служебных свойств. Во многом чувствительность эксплуатационных характеристик механических передач к погрешностям изготовления и сборки звеньев определяется формой зубьев контактирующих колес. Например, широкое применение эвольвентного зубчатого зацепления во многом обуславливается низкой чувствительностью эксплуатационных характеристик к погрешности межосевого расстояния.

Рассмотрим вопрос о влиянии погрешностей изготовления и сборки звеньев на основные эксплуатационные характеристики передач эксцентрикового типа при различных формах зубьев колес. Для этого обратимся к структурным схемам эксцентриковой передачи, изображенным на рис. 1, отличающимся друг от друга формой зубьев сателлита.

Принцип работы эксцентриковой передачи, схемы которой изображены на рис. 1, заключается в следующем. При вращении входного вала 1 с эксцентриком 2 благодаря взаимодействию зубьев сателлита 3 с роликами, закрепленными на неподвижном центральном колесе 4, сателлит 3 совершает плоскопараллельное движение. Вращательная составляющая плоскопараллельного движения сателлита может передаваться на выходное звено различными способами, например, с помощью механизма параллельных кривошипов. Учитывая то, что целью проводимых исследований было изучение влияния формы зубьев сателлита на основные эксплуатационные характеристики эксцентриковой передачи, погрешности вращения выходного звена, возникающие из-за неточностей изготовления и сборки механизма параллельных кривошипов, в данной работе не учитывались. Поэтому в схемах эксцентриковой передачи, показанных на рис. 1, механизм параллельных кривошипов не показан.



- 1 – входной вал; 2 – эксцентрик; 3 – сателлит; 4 – центральное колесо;  
а) с профилем зуба сателлита, полученным на основе укороченной эпициклоиды;  
б) с профилем зуба сателлита, полученным на основе удлиненной эпициклоиды

Рисунок 1. – Структурная схема эксцентриковой передачи

Формообразование зубьев сателлита эксцентриковых передач описано в работе [2]. Следует отметить, что формообразование на основе укороченной эпициклоиды происходит при меньших значениях эксцентриситета  $e$  (см. рис 1, а) по сравнению со случаем удлиненной эпициклоиды (см. рис 1, б).

К основным эксплуатационным характеристикам механических передач следует отнести КПД и кинематическую погрешность вращения выходного звена.

Авторами данной работы были разработаны компьютерные модели структурных вариантов эксцентриковой передачи, показанных на рис. 1. Следует отметить, что при разработке компьютерных моделей имелась возможность учета ряда погрешностей изготовления и сборки. Исследования по определению КПД и кинематической погрешности проводились в среде САПР Siemens NX. Основные результаты компьютерных исследований, отраженные в работе [3], позволили сделать следующие выводы:

- при отсутствии погрешностей изготовления и сборки звеньев КПД эксцентриковой передачи, когда зуб сателлита получен на основе использования укороченной эпициклоиды, на 2-3% выше, чем в случае удлиненной эпициклоиды; кинематическая погрешность в обоих случаях имеет примерно одинаковое значение;

- при наличии погрешностей изготовления и сборки в варианте эксцентриковой передачи с укороченной эпициклоидой происходит уменьшение КПД и увеличение погрешности вращения выходного звена, при этом такие же погрешности изготовления и сборки звеньев практически не влияют на основные эксплуатационные характеристики передачи при использовании удлиненной эпициклоиды.

Результаты компьютерных исследований были подтверждены стендовыми испытаниями экспериментального образца редуктора [4].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Шанников, В. М. Планетарные редукторы с внецентроидным зацеплением / В. М. Шанников. – Москва: Машгиз, 1948. – 172 с.
2. Громыко, П. Н. Использование удлиненной эпициклоиды для формообразования зубчатых поверхностей передач эксцентрикового типа / П. Н. Громыко, С. Н. Хатетовский, В. Л. Юркова // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2019. - № 1. – С. 14-21.
3. Gromyko, P. N. Modeling of eccentric transmission operation in presence of elastic deformations of contacting links / P. N. Gromyko, S. N. Khatetovsky // Proceedings of the International Conference “Aviamechanical Engineering and Transport” (AviaENT 2018). Vol. 158. – p. 160-164.
4. Громыко, П. Н. Минимизация габаритных размеров эксцентриковых передач на основе совершенствования геометрии зацепления контактирующих колес / П. Н. Громыко, С. Н. Хатетовский // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. – Минск: Государственное научное учреждение «Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси», 2019. – Вып. 8. – С. 67-70.

**ВЛИЯНИЕ ВЫСОКОЭНТАЛЬПИЙНЫХ ГОРЮЧИХ ГАЗОВ НА  
СОСТАВ И ДЮРОМЕТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ,  
ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ГИПЕРЗВУКОВОЙ МЕТАЛЛИЗАЦИИ**

**А.В. СОСНОВСКИЙ, Д.И. ТРУСОВ, О.А. ЛАВРЕНОВА**  
*Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси,  
Белорусский национальный технический университет,  
Минск, Беларусь*

*В статье представлены результаты исследований влияния высокоэнтальпийного горючего газа МАФ на состав и дюрометрические свойства покрытий.*

Нагревание и распыление металлических порошков и проволок, хорошо показали себя при упрочнении, защите от коррозии, изнашивания и восстановлении деталей общемашиностроительного профиля. В связи с высокой стоимостью большинства методов газотермического напыления порошковых материалов, актуальными являются исследования по разработке активированных методов формирования покрытий из проволоочных материалов

Гиперзвуковая металлизация – один из активно развивающихся технологий газотермического напыления, позволяющих с высокой производительностью формировать износостойкие и защитные покрытия на деталях различной конфигурации. В отличие от классической схемы электродуговой металлизации, при активированной электродуговой металлизации (рисунок 1) распыление жидкого металла, образующегося в результате теплового воздействия электрической дуги на торцы двух проволоочных электродов, производится струей продуктов сгорания пропано-воздушной смеси.

При этом скорость струи на выходе из сопла достигает 1500 м/с при температуре 2200 К. Это позволяет частицам расплавленного металла двигаться в потоке со скоростью свыше 500 м/с и формировать покрытия, имеющих вдвое выше прочность сцепления с подложкой, чем при ЭДМ [1].

Вместе с тем, существуют газы и смеси газов с более высокими параметрами горения по сравнению с пропаном (более высокоэнтальпийные), например, ацетилен, МАФ, МАПП. Указанное преимущество высокоэнтальпийных газов перед традиционно используемым пропаном при напылении покрытий, прежде всего может быть использовано для повы-

шения прочностных характеристик напыляемых газотермических покрытий. Необходимо отметить, что ацетилен имеет значительный недостаток, а именно склонность к обратному удару и самовоспламеняемость при давлении выше полутора атмосфер. Такая особенность использования ацетилена нивелирует его преимущества, как заменителя пропана. Смеси газов МАФ и МАПП схожи по составу с ацетиленом, однако лишены его отрицательных свойств, поскольку в их составе в качестве стабилизатора содержится пропан. Это позволяет их использовать для напыления покрытий при высоких рабочих давлениях, которые могут достигать значений свыше 1,5 атмосфер. Однако температура МАФ при горении на 150 °С ниже, чем у ацетилена, но на 90°С выше, чем у МАПП [2].

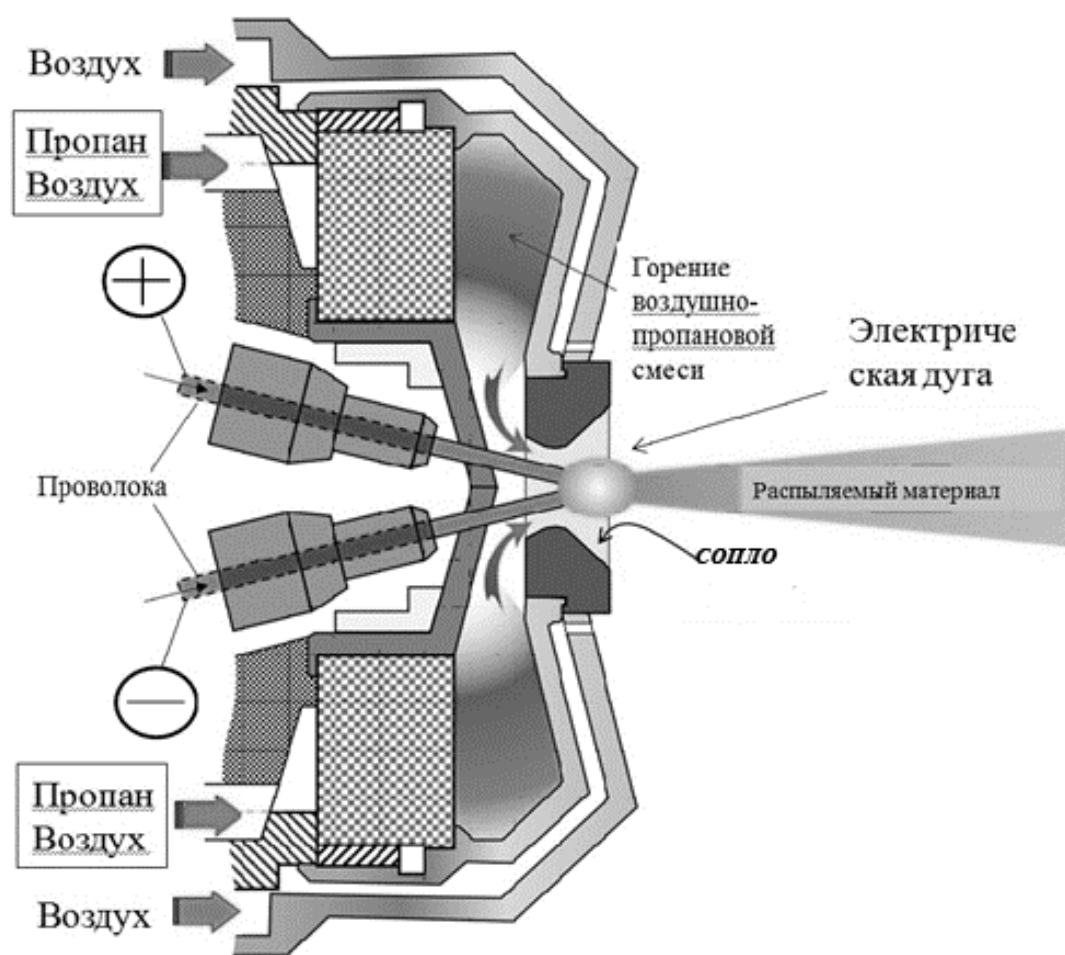


Рисунок 1. – Схема гиперзвуковой металлизации

В качестве объектов исследований были выбраны газотермические покрытия из высокохромистых сталей 40Х13 и 95Х18, напыленные с использованием газа МАФ. Химический состав распыляемых проволок представлен в таблице 1.

Таблица 1. – Химический состав распыляемых проволок

Марка проволо- чной стали	Содержание элементов, масс, %						
	C	Cr	Ni	Ti	Mn	Si	Fe
40X13	0,42	13,20	0,60	0,20	0,35	0,40	основа
95X18	0,96	18,50	0,60	0,20	0,80	0,80	основа

При напылении газотермических покрытий происходит разогрев распыляемых частиц металла до температур свыше 2000°С [2-3], что приводит к интенсивному окислению железа и легирующих элементов, содержащихся в исходной проволоке. В связи с этим, химический состав напыленного покрытия будет отличаться от химического состава исходным материалов. Химический состав покрытий, напыленных с использованием газа МАФ представлен в таблице 2.

Таблица 2. – Химический состав газотермических покрытий

Марка проволо- чной стали	Содержание элементов, масс, %						
	C	Cr	Ni	Ti	Mn	Si	Fe
40X13	0,34	12,9	0,32	0,12	0,3	0,28	основа
95X18	0,82	16,3	0,45	0,14	1,22	0,31	основа

Из данных приведенных в таблице 2 можно видеть, что действительно, содержание всех легирующих элементов в напыленных с использованием горючего газа МАФ газотермических покрытиях ниже, чем их концентрация в исходных проволоках (таблица 1).

Интересно отметить, что дюрометрические свойства газотермических покрытий полученных высокоскоростной металлизацией с использованием пропана ниже по сравнению с аналогичными покрытиями, сформированными с использованием газа МАФ.

Газотермические покрытия полученные методом ВМ с использованием горючего газа МАФ из высокохромистых сталей характеризуются относительно плотной структурой, которая включает в себя  $\approx 25$  об.% оксидов. Пористость покрытий составляет  $\approx 2-4$  об.%. В покрытиях регистрируется аномально высокое количество аустенитной фазы. Это связано с особыми условиями их формирования при напылении, заключающимися в реализации изотермической выдержки покрытия в области температур бейнитного превращения, приводящей к стабилизации  $\gamma$ -фазы [3]. Использование МАФ с более высокой теплотворной способностью приводит к повышению температуры распыляемых частиц, а, следовательно, и увеличению температуры и времени при изотермической выдержке покрытия в

области бейнитного превращения, по сравнению со случаем распыления частиц продуктами сгорания пропана.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Белоцерковский, М.А. Технологии активированного газопламен-ного напы-ления антифрикционных покрытий. – Мн.: УП «Технопринт», 2004. – 200 с.
2. Белоцерковский, М.А. Активированное напыление покрытий ком-плексом «ТЕРКО» / М.А. Белоцерковский, В.Э. Барановский // Газотерми-ческое напыление в промышленности-93. – С.-Петербург, 1993. – С. 74-77.
3. Садовский, В.Д. Остаточный аустенит в закаленной стали / В.Д. Садовский, Е.А. Фокина – М. : Наука. - 1986.- 113 с.

**ФОРМИРОВАНИЕ ГРАДИЕНТА СТРУКТУРЫ  
ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ  
ПРИ МАГНИТНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ УПРОЧНЕНИИ**

**А.В. МИРАНОВИЧ, Л.М. АКУЛОВИЧ, В.Г. МИСЬКО**

**Белорусский государственный аграрный технический университет,  
Минск, Беларусь.**

*Основным показателем, определяющим износостойкость поверхностей в условиях абразивного изнашивания, является структура и микротвердость поверхностного слоя. При магнитно-электрическом упрочнении (МЭУ) формируется градиент структуры поверхностного слоя, обеспечивающий плавный переход свойств материала от слоя к слою. Наибольшей износостойкостью при абразивном изнашивании обладают борированные слои покрытий из порошков ФБ-17 и ФБХ-6-2 с микротвердостью до 18 ГПа.*

Для восстановления изношенных поверхностей деталей в ремонтном производстве наиболее востребованы технологии нанесения износостойких покрытий с одновременным упрочнением поверхностных слоев [1]. К их числу относится магнитно-электрическое упрочнение (МЭУ), использующее концентрированные потоки энергии магнитного поля и электрических разрядов [2]. Такая концентрация потоков тепловой энергии неизбежно приводит к формированию градиента структуры поверхностного слоя. При наличии градиентной структуры стоит задача обеспечить плавный переход свойств материала от слоя к слою с одновременным сочетанием различных эксплуатационные характеристики, которыми не обладают однородные материалы (высокая твердость и ударная вязкость, тепло- и коррозионная стойкость) [3, 4].

Микроструктура упрочненного слоя, обеспечивающая его физико-механические параметры при МЭУ, определяется химическим составом упрочняющего порошка и материала основы.

Эксперименты проводили на цилиндрических образцах из стали 45 (ГОСТ 1050-88), микроструктура которых после закалки (твердость – 240 НВ) представляла собой смесь феррита и сорбитообразного перлита. На поверхность образцов наносили покрытия из двухкомпонентных легированных порошков на основе железа: ферробора ФБ-17 (ГОСТ 14848-69), Fe-2%V и Fe-Ti (ГОСТ 9849-86), а также сплава ФБХ-6-2 (ГОСТ 11546-75).



Микроструктура покрытий изучалась методом оптической металлографии поперечных шлифов с использованием светового микроскопа Mef-3 фирмы «Reichert-Jung» (Австрия) и цифрового фотоаппарата «HP photosmart 715 digital camera». Микротвердость измеряли на приборе ПМТ-3 по стандартной методике при величине статической нагрузки на индентор  $P \sim 0,49$  Н (50 г). Толщину покрытий определяли по распределению микротвердости в поперечном сечении образцов при помощи окулярной вставки с увеличением в 200 раз.

Общим в структурном строении упрочненного слоя исследованных покрытий является то, что в нем можно выделить три зоны: наплавленную, диффузионную и зону термического влияния (рис. 1). Микроструктура упрочненного слоя, определяющая его физико-механические параметры, зависит от химического состава упрочняющего порошка и материала основы.

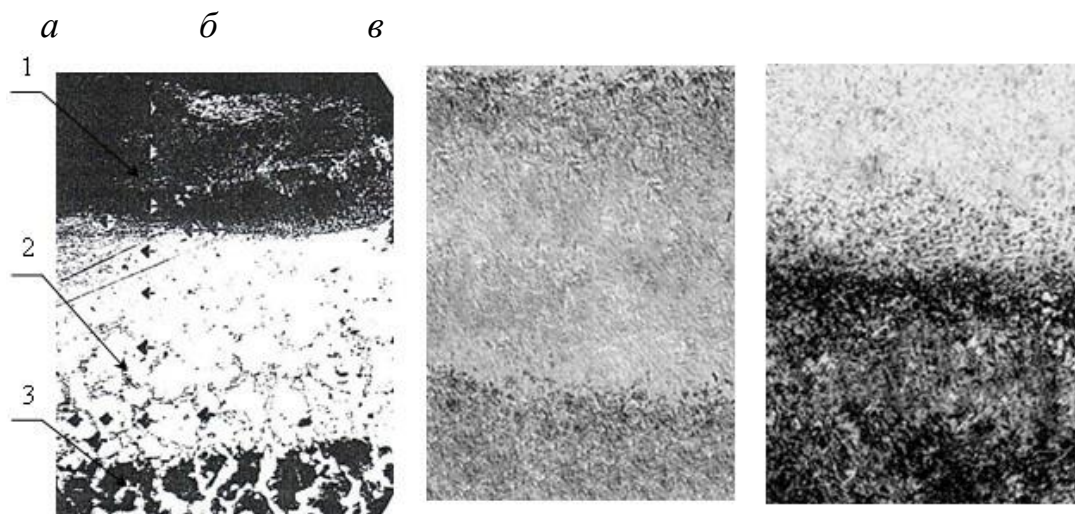
При упрочнении ферробором ФБ-17 основными структурными составляющими являются закалочный мартенсит, сорбит и комплексные бориды на основе FeB и Fe<sub>2</sub>B. Наплавленный слой содержит большое количество мелкодисперсных боридов с микротвердостью 16...18 ГПа (рис. 1 а). Диффузионная зона представляет собой  $\alpha$ -твердый раствор бора в железе с микротвердостью 8...11 ГПа. На границе наплавленного и диффузионного слоев заметен тонкий боридный слой, а на границе диффузионного слоя и матрицы обнаружено повышенное содержание углерода на глубине около 100 мкм.

В покрытии из ФБХ-6-2 наплавленный слой имеет микроструктуру мелкодисперсного строения (рис. 1 б). Поверхностные слои толщиной 100...150 мкм состоят из частиц очень тонкого игольчатого строения размером до 5 мкм, которые вытянуты в сторону основного металла и увеличиваются до 10...15 мкм. Основу покрытия составляет твердый раствор хрома в  $\alpha$ -железе, остаточный аустенит, а также карбиды железа (Fe<sub>2</sub>C), бориды (FeB, CrB<sub>2</sub>, Cr<sub>5</sub>B<sub>3</sub>) и ферроборида (Cr<sub>1,65</sub>Fe<sub>0,35</sub>B<sub>0,96</sub>).

Структура покрытия из ФМП Fe-Ti характеризуется мелкодендритным строением (рис. 1 в), основу которого составляет твердый раствор титана в  $\alpha$ -железе, а также незначительного количества остаточного аустенита, интерметаллидов (FeTi, Fe<sub>2</sub>Ti), карбидов титана (TiC) и железа (FeC). Граница раздела имеет плавный переход, в котором на глубине до 50...90 мкм происходит полная фазовая перекристаллизация материала основы с последовательным образованием структур – однофазной (дисло-

кационный мартенсит) и двухфазной (дислокационный мартенсит и рекристаллизованный феррит).

Покрывание из порошка Fe-2%V также характеризуется мелкодендритным строением, основу которого составляет твердый раствор ванадия в  $\alpha$ -железе, остаточный аустенит, карбиды ванадия ( $V_2C$ ,  $V_4C_{2,67}$ ) и железа ( $FeC$ ,  $FeC_8$ ). Диффузионная зона имеет структуру дислокационного мартенсита. Зона термического влияния представляет собой область неполной закалки, структура которой представляет феррит и отдельные участки перлита, превратившегося в троосто-мартенсит.



1 – наплавленная зона; 2 – диффузионная зона; 3 – зона термического влияния; покрытия из ФМП: а – ФБ-17 ( $\times 200$ ), б – ФБХ-6-2 ( $\times 500$ ), в – Fe-Ti ( $\times 500$ )

Рисунок 1. – Фотографии микроструктуры покрытий после МЭУ

Результаты экспериментальных исследований поверхностного слоя показывают, что микротвердость изменяется по трем четко выраженным участкам – наплавленная зона, диффузионная зона и зона термического влияния. Максимальная микротвердость наблюдается у покрытий из ФМП ФБ-17 (наплавленная зона – до 18 ГПа, диффузионная зона –  $8,0 \div 11,4$  ГПа) и ФБХ-6-2 (наплавленная зона –  $7,3 \div 8,7$  ГПа), что обусловлено формированием в результате скоростного охлаждения мелкодисперсной структуры слоев, в которых присутствуют закалочный мартенсит и комплексные бориды хрома  $CrV_2$ ,  $Cr_5V_3$ , ферроборид  $Cr_{1,65}Fe_{0,35}V_{0,96}$ , а также бориды на основе железа  $FeV$  и  $FeV_2$ .

Характерной особенностью покрытий является высокая однородность наплавленных слоев и, как следствие, незначительные изменения микротвердости по толщине покрытий из порошков Fe-Ti и Fe-2%V (в пределах  $4,5 \dots 6,2$  ГПа).

Экспериментально установлено, что износостойкость борированных слоев на 40-50 % выше, чем цементованных. Поэтому для условий абразивного изнашивания предпочтительно использовать покрытия из ФМП ФБ-17 и ФБХ-6-2.

#### ЛИТЕРАТУРА

- 1 Технология ремонта машин / Е. А. Пучин [и др.] ; под ред. Е. А. Пучина. – М : УМЦ «Триада», 2006. Ч. I. – 348 с.
- 2 Акулович, Л.М. Магнитно-электрическое упрочнение поверхностей деталей сельскохозяйственной техники / Л.М. Акулович, А.В. Миранович. – Минск : БГАТУ, 2016. – 236 с.
- 3 Minko, D. Biomechanical properties of composite compact-porous titanium produced by electric discharge sintering / D. Minko, K. Belyavin, V. Sheleg // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2017. – V. 218. – № 012008; doi:10.1088/1757-899X/218/1/012008.
- 4 Минько, Д.В. Влияние параметров импульсного лазерного воздействия на формирование градиента структуры пористых материалов из порошка титана / Д.В. Минько // Литье и металлургия. – 2018. – № 3(92). – С. 88–94.

## АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ МЕТОДЫ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ СИСТЕМ COMMON RAIL СОВРЕМЕННЫХ ДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

*Д.С. ШЕВЧЕНКО, А.А. ГУЩА*

*Полоцкий государственный университет, Беларусь*

**Введение.** Система впрыска Common Rail является современной системой впрыска топлива дизельных двигателей. В легковых автомобилях используется несколько видов систем Common Rail. Упрощенно их можно разбить на два типа (электромагнитные и пьезоэлектрические) и четыре производителя (Bosch, Continental, Delphi, Denso). Самым универсальным является лидер рынка - Bosch, который производит оба типа форсунок: электромагнитные и пьезоэлектрические. В гораздо меньших масштабах оба вида форсунок производят Delphi и Denso. Continental (Siemens) ограничивается исключительно пьезоэлектрической техникой [1,2].

Диагностирование двигателей с системой Common Rail заключается в определении неисправностей и оценке состояния трех взаимосвязанных частей: механических узлов двигателя, электронной системы управления и гидравлической части.

Последовательная проверка всех названных компонентов занимает много времени. Чтобы ускорить поиск возможных отклонений блок управления снабжен функцией мониторинга исправности датчиков и исполнительных механизмов. При обнаружении блоком отклонений в показании, каких-либо датчиков в оперативной памяти прописывается ошибка. В зависимости от значимости ошибки впрыскивание топлива продолжается или двигатель останавливается. С помощью сканера в меню параметры можно посмотреть реальные показания и реакцию датчиков на различные возмущения. Важной особенностью Common Rail является то, что каждая форсунка управляется индивидуально т.е. на каждой форсунке прописываются свои коэффициенты топливо-коррекции по которым можно судить об состоянии каждого цилиндра и соответствующей форсунки. Если мы обнаружили значительную топливо-коррекцию в каком-то цилиндре, это может быть связано или с низкой компрессией в цилиндре или неисправностью форсунки.

При неисправностях, которые не выводят систему из строя, блок управления ограничивает топливоподачу. К таким дефектам относятся неисправности датчиков температуры, слишком низкое давление наддува,

неполадки с замером расхода воздуха, или выход из строя датчика положения педали газа.

Диагностику желательно начинать с подключения сканера, чтобы определить возможные направления поиска и потому что это наименее трудоемкая операция.[3]

Большинство проблем, связанных с этими системами лежит не в области высокого давления, а в низкой цепи от бака до ТНВД (топливный насос высокого давления). Комплект CRDI-500 предназначен для быстрой проверки состояния цепи низкого давления через подключение к трубопроводу в удобном месте с помощью стандартных быстросъёмных адаптеров. С их помощью можно подключиться к 70% топливных магистралей без дополнительных адаптеров.

Вначале требуется проверить правильность подсоединений, если они правильные – ищем утечки в штуцерах. Если утечек нет, то необходимо проверить исправность и соответствие топливного фильтра.

Далее требуется отсоединить топливную трубку от топливного фильтра и подсоединить манометр низкого давления, или вакуумметр, в зависимости от системы двигателя.

Запускаем двигатель и держим на холостых оборотах примерно 5 сек, затем глушим двигатель. Читаем показания манометра или вакуумметра. Анализируем эти данные.[4]

Существует традиционный метод оценки работы форсунок с использованием специализированных стендов. Основным недостатком использования стенда является трудоёмкость снятия форсунок, затраты времени на последующую установку форсунок на автомобиль. Иногда сказывается так же и затрудненный доступ к инжектору, что влечёт за собой снятие дополнительных узлов двигателя. В данном случае, для выполнения этих процедур необходимо наличие специального инструмента, съёмников.

Так же весомым фактором является большая цена таких стендов, их размеры, что является минусом для использования в небольших СТО.

Особенность систем Common Rail заключается в том, что состояние электромагнитного клапана можно определить с помощью обратного слива топлива. Только на инжекторе CommonRail можно померить обратный слив топлива и посредством этой проверки увидеть состояние электромагнитного клапана форсунки CommonRail. В случае негерметичности электромагнитного клапана то количество топлива, которое должно попасть в камеру сгорания, попадет в обратный слив, и таким образом проявляется неисправность автомобиля. Проанализировать эту информацию можно, используя специальный аппарат.

Прибор состоит из набора мензурок, имеющих или не имеющих деления. От них отходят прозрачные трубки с быстросъемным соединением на конце. Подключая их к форсункам Common Rail прямо на двигателе, можно наблюдать равномерность обратного сброса (как заполняются эти мензурки) на различных режимах за определенный промежуток времени. Процедура не занимает много времени, но с диагностической точки зрения очень эффективна. Инжектор, у которого показания в три раза отклоняются от нормы подлежит замене.

Проверка ТНВД проводится с использованием Тестера common rail традиционным способом. Если давление топлива, показанное на индикаторе, соответствует спецификации, то ТНВД в норме.

Для проведения теста регулятора давления топлива повторяем схему предыдущего опыта, только к обратному сливу регулятора присоединяем мерную мензурку. Вращаем стартером двигатель в течение 5 сек и замеряем количество топлива вытекающего с обратного слива, оно не должно превышать 10 мм.[5]

Существуют так же методики диагностирования пьезофорсунок с использованием мотортестера.

Так, Андреем Шульгиным был разработан скрипт CSS. Смысл этого скрипта заключается в том, что записывается сигнал с датчика частоты вращения коленчатого вала на определённых режимах работы двигателя, и сигнал синхронизации с первым цилиндром. Затем запускается автоматический анализ записанных сигналов, задав несколько вводных данных, а именно: порядок работы цилиндров и начальное опережение зажигания. После этого скрипт, на основе заложенных в него алгоритмов, построит достаточно информативный график эффективности каждого цилиндра.

Таким образом, использование скрипта CSS позволяет провести диагностику форсунок без разборки двигателя, что помогает сэкономить время диагностику и значительно сократить трудовые затраты. Наличие диагностики механической части во многом полезна для предварительного анализа состояния двигателя, что так же позволяет отсеять ряд предполагаемых неисправностей.

**Заключение.** Выполнение диагностирования топливной системы при помощи альтернативных методов значительно проще и при этом достаточно точно позволяет выявить неисправность, как и традиционные методы.

Альтернативный метод диагностирования имеет преимущество в том, что требует значительно меньших затрат, так как при использовании

данного метода не требуется дорогостоящее оборудование, используемое на станциях технического обслуживания.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Системы современного автомобиля [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://systemsauto.ru/>, свободный. -Яз. рус. –Дата доступа 20.02.2020.
2. Википедия, современная энциклопедия [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/>, свободный. -Яз. рус. –Дата доступа 20.02.2020.
3. Автомастер – ремонт, диагностика автомобилей и двигателей [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.avtomaster21.ru/>, свободный. - Яз. рус. –Дата доступа 20.02.2020.
4. Диагностика дизельных двигателей [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.common-rail.ru>, свободный. -Яз. рус. –Дата доступа 20.02.2020.
5. Kia CRT-1500 Common Rail Tester – Руководство Пользователя.

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ДВИГАТЕЛЕМ

**В.В. КОСТРИЦКИЙ, А.В. ПАВЧЕНКО**

*Полоцкий государственный университет, Беларусь*

*В статье рассмотрены методики диагностирования электронных систем управления двигателем при помощи сканера и мотортестера. Выявлены причины неустойчивой работы двигателя на малых оборотах, повышенного расхода топлива и ухудшения динамических характеристик, диагностируемого этими приборами, автомобиля, и определен наиболее эффективный метод диагностирования электронных системы управления двигателем.*

**Введение.** Диагностика любого датчика электронной системы управления двигателем (ЭСУД) сводится к проверке адекватности преобразования физического параметра в электрический параметр [1].

В исследовательской работе с целью выявления причины неустойчивой работы двигателя на малых оборотах, повышенного расхода топлива и ухудшения динамических характеристик автомобиля Volkswagen Bora 1998 г с двигателем AKL было проведено диагностирование датчиков ЭСУД. При этом для проверки исправности датчиков применяются два диагностических прибора: сканер и мотортестер.

**Диагностирование при помощи сканера.** При выполнении исследовательской работы диагностирование датчиков ЭСУД выполнялось при помощи сканера Launch 431 Pro. Диагностирование сканером не заняло много времени. Методика диагностирования заключалась в следующем:

1. Подключить сканер к OBD2-разъёму автомобиля, предварительно определив, где он находится.
2. Выбрать из предложенного списка сканером марок автомобилей соответствующую диагностируемому автомобилю.
3. После чего сканер произведет автоматическое выявление неисправностей. При этом если есть неисправности, то на экране высвечиваются их цифровые коды, хранящиеся в памяти блока управления автомобилем

После автоматической проверки системы сканер не выявил неисправностей.



**Диагностирование при помощи мотортестера.** При выполнении исследовательской работы диагностирование датчиков выполнялось при помощи мотортестера USB Autoscope 4.

Для того чтобы оценить выходной сигнал датчика при помощи мотортестера, необходимо подключить его щупы к цепи датчика: один к минусовому проводу, другой к сигнальному проводу. Поэтому для диагностирования ЭСУД при помощи мотортестера в первую очередь необходимо знать состав датчиковой аппаратуры, расположение их штекерных соединений и разводку проводки в блоке управления. Для этого необходимо иметь электрическую схему и схема расположения элементов в подкапотном пространстве.

Диагностирование датчиковой аппаратуры при помощи мотортестера заключается в просмотре осциллограмм с целью выявления отклонений сигнальных напряжений от эталонных.

При проверке шести датчиков не было выявлено отклонений в их работе. Осциллограммы выходных сигналов этих датчиков на всех режимах диагностирования соответствовали осциллограммам исправных датчиков. Седьмой же датчик, а именно датчик концентрации кислорода не прошел проверку т.к. его осциллограммы не соответствуют правильной работе.

**Проверка работоспособности датчика концентрации кислорода.** Датчик кислорода (лямбда-зонд) – устанавливается в выхлопном коллекторе таким образом, чтобы выхлопные газы обтекали рабочую поверхность датчика. В зависимости от концентрации кислорода в выхлопных газах, на выходе датчика появляется сигнал. Уровень этого сигнала может быть низким (0,1...0,2 В) или высоким (0,8...0,9 В). Таким образом, датчик кислорода – это своеобразный переключатель, сообщающий контроллеру впрыска о качественной концентрации кислорода в отработавших газах. Таким образом, по сигналу от лямбда-зонда блок управления двигателем корректирует длительность впрыска топлива так, что состав топливовоздушной смеси оказывается максимально близким к стехиометрическому (идеальное соотношение воздух/топливо) [3].

Для просмотра осциллограммы напряжения выходного сигнала датчика концентрации кислорода пробник щупа должен быть подсоединён параллельно сигнальному выводу датчика (рисунок 1).

После подсоединения осциллографического щупа и выбора режима отображения осциллограммы напряжения необходимо запустить двигатель. После пуска двигателя, чтобы датчик вступил в работу необходимо дать ему прогреться. Однако у данного датчика зона прогрева отсутствует

(рисунок 2, а). При этом напряжение выходного сигнала при работе двигателя на холостом ходу почти стабильное, его значение близко к опорному напряжению и лежит в диапазоне от 525 до 625 мВ (рисунок 2, б).

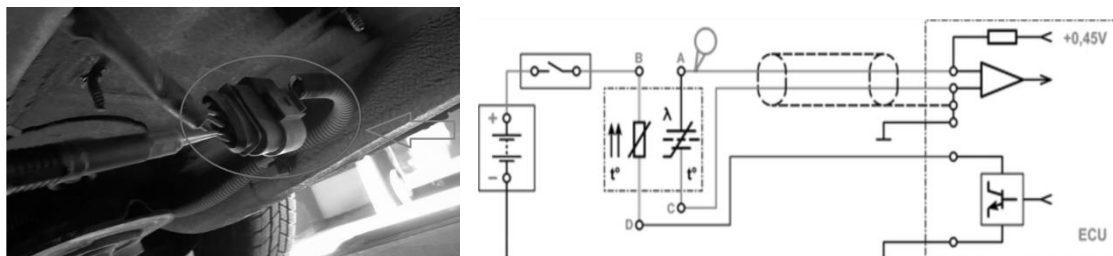
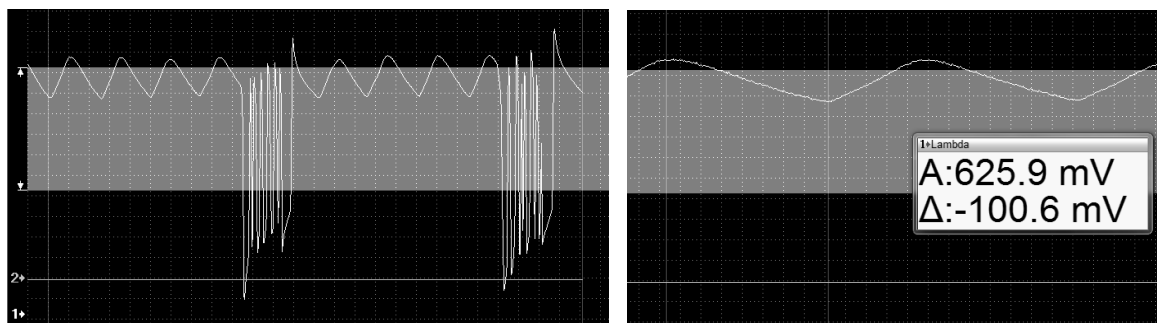


Рисунок 1. – Подключение к датчику концентрации кислорода при помощи щупов мотортестера



а) Отсутствие зоны прогрева

б) Сигнал на холостом ходу

Рисунок 2. – Отсутствие зоны прогрева

Для исправного датчика концентрации кислорода напряжение выходного сигнала при работе двигателя на холостом ходу должно изменяться от 0,2 до 0,9 В.

Когда двигатель работает на обогащённой топливо-воздушной смеси, уровень содержания кислорода в отработавших газах понижен, при этом датчик генерирует сигнал высокого уровня напряжением 0,9 В. При поступлении сигнала высокого уровня от лямбда-зонда, блок управления двигателем начинает уменьшать длительность впрыска топлива, тем самым обедняя топливо-воздушную смесь. Когда двигатель работает на обеднённой топливо-воздушной смеси, уровень содержания кислорода в отработавших газах повышен, при этом датчик генерирует сигнал низкого уровня напряжением 0,2 В. При этом время переключения сигнала не должно превышать 120 мс, а частота переключения не должна быть ниже 2 Гц.

В случае диагностируемого датчика концентрации кислорода время переключения сигнала составила 4,4 секунды, а частота переключения сигнала составила 84,46 мГц (рисунок 3).

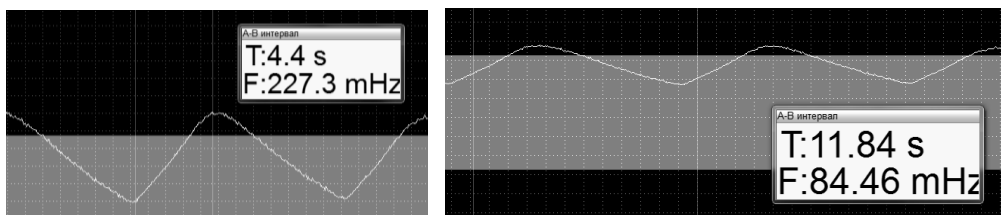


Рисунок 3. – Время и частота переключения сигнала

По полученным значениям напряжения выходного сигнала при работе двигателя на холостом ходу, времени и частоте переключения можно сделать вывод, что датчик концентрации кислорода неисправен и подлежит замене.

Неисправность датчика концентрации кислорода является причиной неустойчивой работы двигателя на малых оборотах, повышением расхода топлива, а также ухудшением динамических характеристик автомобиля.

По итогам исследования можно сделать следующие выводы.

1. Работа сканером более проста и удобна, однако обмен информацией между ЭБУ и сканером происходит достаточно медленно, и какие-то интересные и важные моменты сигнала можно попросту не обнаружить.

2. Мотортестер позволяет оценить сигнал датчика очень качественно и подробно, не пропустив ни малейшей детали, хотя трудоемкость его применения выше, чем у сканера.

3. Только при помощи мотортестера была выявлена неисправность ЭСУД в частности неисправность датчика концентрации кислорода, которая и являлась причиной неустойчивой работы двигателя на малых оборотах, повышением расхода топлива, а также ухудшением динамических характеристик автомобиля.

4. Современный автомобиль невозможно представить без электронной системы управления, поэтому многие СТО стремятся предоставлять услуги для диагностирования этой системы, при этом зачастую обходятся только сканером, а как показывает практика для оценки состояния ЭСУД такого диагностического оборудования недостаточно. Использование мотортестера и осциллографа требует специальных знаний, умений и навыков, которые лежат на границе дисциплин связанных с устройством автомобиля и дисциплин электротехники и электроники.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Коваленко, О. Л. Электронные системы автомобилей: учебное пособие / О.Л. Коваленко; Сев. (Арктич.) федер. ун-т им. М.В. Ломоносова. – Архангельск: ИПЦ САФУ, 2013. – 80 с.

2. Режим доступа: <http://chiptuner.ru/content/sensor/>. – Дата доступа: 01.05.2016 г.

3. Режим доступа: [http://injectorservice.com.ua/docs/temperature\\_sensor\\_diagnostics.pdf](http://injectorservice.com.ua/docs/temperature_sensor_diagnostics.pdf). – Дата доступа: 01.05.2016 г.

## ТЕХНОЛОГИЯ РЕМОНТА ТРЕЩИН ЧУГУННОЙ ГОЛОВКИ БЛОКА ЦИЛИНДРОВ

*О.П. ШТЕМПЕЛЬ, М.В. КОНОН, И.М. КОНОН*  
*Полоцкий государственный университет, Беларусь*

**Обоснование.** При оценке возможности ремонта чугунной головки блока цилиндров (далее ГБЦ) исходят из целесообразности затрат с учетом технологических возможностей и предполагаемого ресурса отремонтированной детали.

Конструктивно заделка трещин ГБЦ возможна на участках доступных для предварительной и окончательной обработки, в том числе абразивной.

Одним из условий успешной заделки трещин является то, что характер повреждений (глубина трещины) минимален и не касается других участков и магистралей, т.е. находится в толще металла.

Основные недостатки существующих способов заварки трещин проявляются в отбеливании чугуна высокотемпературным перегревом, поэтому была предпринята попытка апробировать способ заделки с предварительным напылением подслоя.

**Концепция.** Предлагается способ заделки трещин головки блока цилиндров из высокопрочного чугуна.

Трещина образовалась из-за температурного перегрева с местной локализацией по концентрации нагара.

Способ апробировался на трещине длиной 30 мм и максимальной шириной 2 мм по глубине 3-4 мм.

**Технология производства работ.** Очистка поверхности от нагара, копоти с помощью ручных и механизированных щеток.

1. Разделка трещин концевыми абразивными наконечниками на глубину 5-6 мм, по ширине 5-6 мм с углом развала нижнего профиля 60 градусов. Глубина разделки предполагает выработку металла до начала места разлома и появления однородности.

2. Чеканка формообразующей поверхности для увеличения шероховатости, придания рельефа под углом к плоскости разделки. Поверхность после чеканки улучшает сцепляемость с напыляемым слоем (рис. 1).

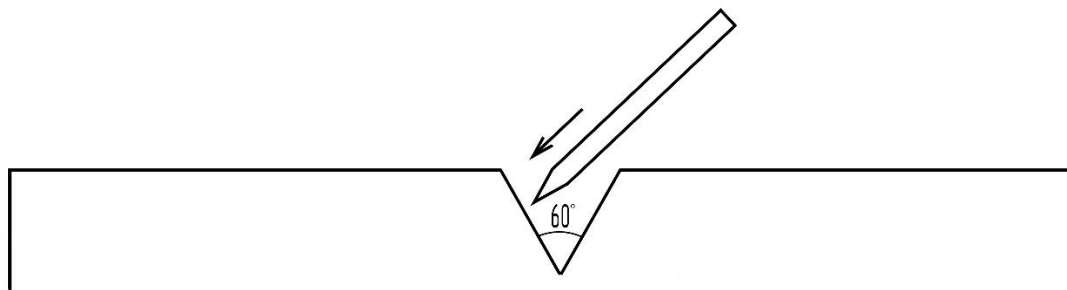


Рисунок 1. Чеканка формообразующей поверхности

3. Обезжиривание поверхности ацетоном или уайт-спиритом.
4. Газопламенное напыление порошка БрАЖМц 9-33, толщиной 1-1,5 мм на разделанную поверхность без оплавления.
5. Аргондуговая сварка, непосредственно после напыления с заполнением шовной канавки присадочной проволокой СВ-0,8 диаметром 1,2 мм при постоянном токе 90-100 А обратной полярностью до образования валика шва с превышением над поверхностью 0,5 – 1 мм (рис. 2).

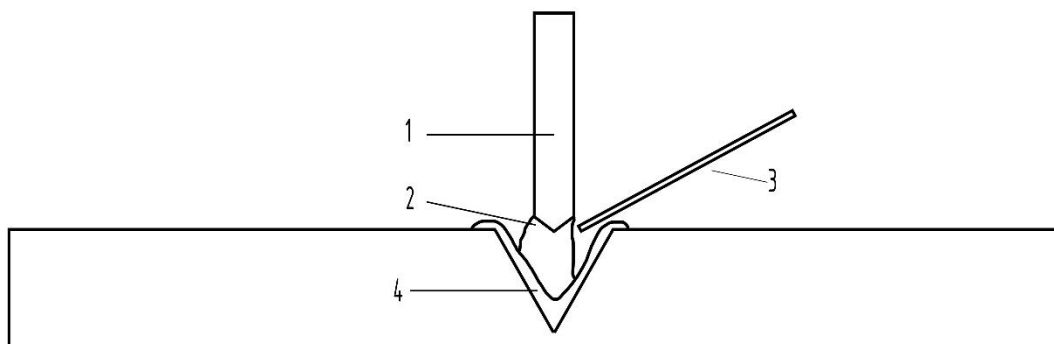


Рисунок 2. Аргондуговая сварка:

- 1 – неплавящийся электрод; 2 – электрическая дуга; 3 – присадочный материал;  
4 – напылённый подслоя

6. Охлаждение естественным путем на воздухе до комнатной температуры.
7. Зачистка шва путем удаления валика абразивным кругом.
8. Контроль качества методом цветной дефектоскопии.

### **Обоснование примененных методов в предложенной технологии.**

1. Предварительное кернение разделанной поверхности позволяет:
  - а) получить рельеф поверхности, способствующий улучшению сцепления, напыляемого слоя с чугуном
  - б) выкрашивание графитных включений с поверхности
  - в) получение химически активного слоя наклепом.

2. Напыление подслоя из бронзы позволяет:
- а) избежать перегрева чугуновой поверхности по раскрою (не допустить отбеливания)
  - б) получить переходной слой с хорошей механической сцепляемостью с поверхностью детали
  - в) приобрести демпфирующие свойства переходной области при циклических температурных колебаниях работы двигателя.

3. Температура сварочной ванны при заполнении была  $960^{\circ}\text{C}$  и ее воздействие было кратковременным, что предполагает отсутствие перегрева и как следствие – отбеливание.

**Выводы.** Примененная технология показала стойкость шва к циклическим температурным нагрузкам и обеспечила однородность и механическую прочность шовной поверхности.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Восстановление деталей машин: справочник/ Ф.И. Пантелеенко [и.др.]; под ред. В.П. Иванова. – М.; Машиностроение, 2003. – 672 с.
2. Карагодин, В.И. Ремонт автомобилей и двигателей/ В.И.Карагодин, Н. Н. Митрохин. – М.: Мастерство; Высш. школа, 2003 – 496 с.
3. Технология производства и ремонта автомобилей: учебник/ В.К. Ярошевич, А.С. Савич, В.П. Иванов. – Минск: Адукацыя і выхаванне, 2011. – 592 с. : ил.

## ФОРМИРОВАНИЕ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ НА ПОВЕРХНОСТИ ПОЛИМЕРНЫХ ДЕТАЛЕЙ

**М.А. БЕЛОЦЕРКОВСКИЙ, И.И. ТАРАН**

*Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси,*

*Минск, Беларусь*

**П.И. КОТ**

*Белорусский национальный технический университет,*

*Минск, Беларусь*

Одним из наиболее перспективных направлений развития материаловедения для транспортного машиностроения и аэрокосмической промышленности является изыскание путей замены металлических деталей на полимерные с металлическими покрытиями, что позволит значительно снизить массогабаритные характеристики изделий. При этом необходима разработка таких приемов формирования покрытий, которые бы обеспечили их толщину 0,2 – 1,5 мм при адгезии не ниже 4 МПа, т.е. позволили бы сохранить определенную механическую прочность.

Авторами данной работы предложена два варианта технологий формирования износостойких покрытий на полимерных деталях. В первом используется нанесение на подготовленную поверхность полимера покрытия из алюминия или его сплавов методом гиперзвуковой металлизации (ГМ), далее следует механическая обработка алюминиевого покрытия в необходимый размер, затем микродуговое оксидирование (МДО) алюминиевой поверхности, позволяющее модифицировать алюминий в корунд [1]. По второму варианту предусматривается формирование различных промежуточных слоев методом ГМ и окончательное нанесение стального износостойкого покрытия. Наибольшая твердость и износостойкость поверхностного слоя достигается при использовании первого варианта.

В отличие от многих других способов газотермического напыления, метод ГМ позволяет изменять состав распыляющего газового факела, увеличивая или уменьшая в горючей смеси количество окислителя. Как правило, в процессе ГМ используется факел, получаемый при горении смеси стехиометрического состава (соотношение объемов воздуха и пропана равно 22÷24:1), или при избытке окислителя (25÷27:1). Однако повышение окислителя (воздуха) вызывает увеличение количества оксидов, что категорически недопустимо при МДО алюминия и его сплавов, поскольку

снижается толщина оксидированного слоя и увеличивается продолжительность оксидирования.

Для определения необходимого состава газовой смеси распыляющего факела при ГМ были проведены исследования, позволившие оценить зависимость толщины и времени оксидирования покрытий от количества в них оксидов после напыления и соотношения газов в пропано-воздушной смеси. Соотношение воздуха и пропана выбирали, начиная с 15:1 — нижний предел воспламеняемости и горения пропана. Количество оксидов  $Al_2O_3$  оценивалось рентгеновским методом на дифрактометре ДРОН-3,0. Толщина оксидированного слоя определялась по поперечным шлифам. Результаты приведены в таблице 1.

Таблица 1. – Влияние соотношения газов, формирующих распыляющий факел при ГМ на параметры покрытия

Исследуемые параметры покрытия	Соотношение газов в смеси						
	15:1	16:1	17:1	18:1	19:1	20:1	21:1
К-во оксидов, об, %	2,8	3,0	3,2	3,5	4,2	6,1	7,6
Толщина оксидир. слоя после обработки в течение 1,5 ч., мкм	175	165	150	140	120	95	60

Анализ данных из таблицы 1 показывает, что наилучшие результаты (максимальная толщина покрытий при минимальном количестве оксидов) обеспечиваются при соотношении воздуха и пропана в смеси от 15:1 до 18:1.

Дальнейшие исследования позволили установить зависимость адгезии ГМ-покрытий из алюминия к поверхности термопластичных полимеров от размера распыленных частиц и температуры термоокислительной деструкции полимеров. Изменение (уменьшение или увеличение) размера распыляемых частиц алюминия осуществлялось изменением давления в камере сгорания газовой смеси установки АДМ-10 и применением инверторного источника «ESAB Varcior 503», обеспечивающего пульсирующий характер тока дуги. Размер частиц оценивали по стандартной методике (распыление в воду и последующий замер). При математической обработке этих результатов получена эмпирическая зависимость между величиной максимального размера распыленных частиц алюминия и температурой термоокислительной деструкции (см. формулу). При этом учитывались только те результаты, которые обеспечивали прочность сцепления покрытий с основой свыше 2,5 МПа:

$$d \leq k \ln(T_d) - N,$$



где  $d$  – размер распыленных частиц, мкм;  
 $T_d$  – температура термоокислительной деструкции полимера, °С;  
 $k$  – коэффициент, численно равный 62,5 мкм;  
 $N$  – коэффициент, численно равный 305 мкм.

Дальнейшие исследования были посвящены выбору материала подслоя, обеспечивающего наибольшую адгезию алюминиевого покрытия с полимерной подложкой. Установлено, что наибольшую прочность сцепления покрытия с основой (6–7,5 МПа) обеспечивает подслои из никеля, а наименьшую (2,5–3,5 МПа) — подслои из цинка. Максимальная величина прочности сцепления подслоя из цинка и алюмоцинка обеспечивается при давлении, подаваемом на распыление газа, 0,3 МПа, в то же время для никеля данная величина составляет 0,35 МПа.

Исследования влияния дробеструйной подготовки поверхности на прочность сцепления показали, что наибольшую адгезию обеспечивает дробь грануляцией 250 мкм. Причем эта величина соответствует для всех типов подслоя, а также для различных давлений газа, подаваемого на напыление.

Сравнительная оценка износостойкости оксидированных слоев и образцов из высокопрочного чугуна марки ВЧ50-7, закаленных путем нагрева газовым пламенем и охлаждением в масле до твердости 50–55 HRC, осуществлялась на машине трения АТВП. Установлено, что интенсивность изнашивания чугунных образцов при сухом трении составила от 320 до 400 мкм/км, что в 2 и более раз превышает интенсивность изнашивания оксидированного напыленного покрытия.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Формирование металлических покрытий на полимерных материалах методом гиперзвуковой металлизации / М.А. Белоцерковский [и др.] // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: С.Н. Поддубко [и др.]. — 2018. — № 7. — С. 366–368.

## КОМБИНИРОВАННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ УЗЛОВ ТРЕНИЯ СКОЛЬЖЕНИЯ

**М.А. БЕЛОЦЕРКОВСКИЙ**

*Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси,*

*Минск, Беларусь*

**А.П. ЯЛОВИК**

*ОАО «Нефтезаводмонтаж», Новополоцк, Беларусь*

**Е.Ф. КОНОВАЛОВА**

*Белорусский национальный технический университет,*

*Минск, Беларусь*

Одним из наиболее эффективных путей решения задачи повышения ресурса и улучшения работоспособности восстанавливаемых деталей пар трения скольжения, эксплуатирующихся в широком диапазоне удельных нагрузок, является формирование покрытий толщиной 0,2–1,5 мм технологиями распыления проволок из высоколегированных сталей. Однако, в ряде случаев, согласно документации производителя, требуется обеспечить твердость восстановленных поверхностей не менее 60 HRC. Это относится к таким быстроизнашивающимся элементам трибосопряжений, как валы каландров, цилиндры печатных машин, стойки гидрокрепей, плунжеры и т.п.

Традиционным методом восстановления штоков гидроцилиндров является шлифование изношенной наружной поверхности штока до выведения следов износа и последующее «твердое» хромирование [1], но он не применим для штоков, на поверхности которых имеются следы коррозии, задиры и забоины или когда износ превышает 60 - 70 мкм. У гидроцилиндров с открытым выходом штока повторяемость указанных дефектов составляет более 70%. Технология электроконтактной приварки стальной ленты в данном случае также не подходит, поскольку не обеспечивается требуемая твердость. Более высокие показатели обеспечивает технология электродуговой наплавки с последующим гальваническим нанесением слоя хрома [2]. Однако, в процессе вибродуговой наплавки невозможно избежать интенсивного нагрева восстанавливаемой поверхности, которая недопустима при восстановлении валов (штоков) диаметром менее 120 мм, поскольку в результате отпуска резко снижаются механические свойства. Помимо того, гальваническое нанесение покрытий на подложки высокохромистых и высокоуглеродистых сталей, а также хромоникелевых сплавов требует многокомпонентных специальных составов сред, строго

соблюдения температурного режима и при этом не гарантирует положительного результата [3].

Авторами данной работы была предложена технология восстановления деталей узлов трения скольжения, включающая подготовку изношенной поверхности под газотермическое напыление, нанесение покрытия распылением проволок из высокохромистой стали газопламенным методом или гиперзвуковой металлизацией, шлифование, нанесение методом деформационного плакирования слоя меди и последующее хромирование [4].

В данной комбинированной технологии использование процессов газотермического напыления вместо электродуговой наплавки позволяет исключить нагрев восстанавливаемой поверхности выше 120 – 150 °С и сохранить механические свойства материала штока, достигнутые различными термообработками в процессе его изготовления. Нанесение слоя меди обеспечивает возможность формирования на нем слоя твердого хрома, используя широко применяемые составы для гальванического осаждения. При этом процесс деформационного плакирования щетками медного слоя взамен химического или электрохимического осаждения легко реализуется и не требует специальных емкостей, растворов и значительного расхода электроэнергии.

Выбор проволоки из высокохромистых сталей (содержание хрома более 14%) обусловлен необходимостью обеспечения высокой коррозионной стойкости покрытия, находящегося под слоем хрома. Даже при незначительном локальном нарушении сплошности хрома (трещина, забоина, царапина, отслаивание) в этих местах развиваются интенсивные процессы разрушения, если материал не способен противостоять коррозии. Но при этом требуется наличие высоких механических свойств, поэтому нержавеющие стали аустенитного класса (типа 12X18H10T) использовать нельзя. Твердость наносимого газотермического покрытия должна быть не ниже твердости материала штока после поверхностной закалки. Как правило, штоки гидроцилиндров и несущие стойки шахтных гидрокрепей изготавливают из стальных поковок 30 ХГСА или 40Х, а перед шлифовкой производят поверхностную закалку до HRC 42...44 [5]. Исходя из этого, необходимым сочетанием свойств обладают покрытия из высокохромистых сталей мартенситного класса с содержанием углерода не менее 0,4%. К таким сталям относятся, например, стали типа 40X13, 45X14H14B2M, 65X13, 95X18.

Авторами были проведены экспериментальные исследования по деформационному плакированию медью стальных газотермических покрытий металлическими щетками, позволившие установить связь между толщиной слоя меди со 100% сплошностью и максимальным размером (диаметром) поверхностных пор стального покрытия. Покрытия наносились

распылением проволок диаметром 1,8 мм из стали 40Х13 с помощью установок газопламенного проволочного напыления «ТЕРКО» и гиперзвуковой металлизации АДМ-10 на паспортных режимах. Изменение пористости покрытий обеспечивалось изменением дистанции напыления. Деформационное плакирование медью осуществлялось на экспериментальной установке конструкции ОИМ НАН Беларуси вращающейся металлической щеткой с проволочным ворсом из гофрированной стальной проволоки, диаметр и ширина щетки составляли соответственно 150 и 15 мм, линейная скорость вращения 35,0...37,0 м/с, диаметр и вылет ворса – 0,25 и 35 мм соответственно. Медный донор, изготовленный в виде таблетки, прижимали к стальному ворсу с усилием 40 Н. Толщина плакирующего слоя измерялась с помощью прибора МТЦ – 3. Шероховатость поверхности по параметру Ra не превышала - 0,8...0,9 мкм. Сплошность, поверхностную пористость покрытий и размеры пор определяли на микроскопе «Polyvar» с помощью программного комплекса «Autoscan».

Математическая обработка результатов позволила получить зависимость между размером пор газотермических покрытий и толщиной слоев меди, имеющих 100% сплошность, которая описывается следующим выражением:

$$S = A + Bd_0^2 - 0,12d_0,$$

где:  $S$  – толщина слоя меди, мкм;

$d_0$  – максимальный диаметр поверхностных пор покрытия, мкм;

$A = 5...8$  мкм – коэффициент, зависящий от толщины игл щетки;

$B = (3,8...4,2) \cdot 10^{-3}$  мкм – коэффициент, зависящий от скорости полета и размера распыленных частиц проволоки.

Для покрытий, полученных распылением проволок газопламенным методом (скорость полета частиц около 100 м/с, средний размер распыленных частиц 60 мкм) коэффициент  $B$  составляет  $4,2 \cdot 10^{-3}$  мкм. Для покрытий, полученных гиперзвуковой металлизацией (скорость полета частиц около 400 м/с, средний размер частиц 20 мкм) коэффициент  $B$  составляет  $3,8 \cdot 10^{-3}$  мкм.

Предложенная комбинированная технология отличается экономичностью, простотой реализации и экологической безопасностью.

#### Литература

1. Корчмарь, А.Г. Разработка технологии восстановления и упрочнения электrolитическими покрытиями длинномерных валов сельскохозяйственных машин: на примере штоков гидроцилиндров: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.03. / А. Г. Корчмарь. – Кишинев, 1991. – 293 л.

2. Восстановление штоков (наплавка, шлифовка, хромирование и полировка) // Электронный ресурс: <http://www.сваебой-строймаш.рф/index.php/uslugi>. - Дата доступа 07.01.2020 г.

3. Демин А.А. Особенности электроосаждения хрома и его сплавов из сернокислых электролитов. Сб. трудов 7 Всесоюзной конференции по электрохимии, Москва, 1988, Т.1, с.359.

4. Способ восстановления штока гидроцилиндра: пат. 032976, Евразийское патентное ведомство / М. А. Белоцерковский, М.А. Леванцевич, А.В. Сосновский, Е.Ф. Коновалова, А.П. Яловик // Бюллетень ЕПВ «Изобретения» №8, 2019 г.

5. Тимошкин С.И. Гидроцилиндры – причины выхода из строя и требования к монтажу / Главный механик. – 2009. – № 2. – С. 23–27.

## ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПРЕССОВОЙ ОСНАСТКИ ПЛАЗМЕННОЙ НАПЛАВКОЙ

**С.В. ПИЛИПЕНКО, В.А. ФРУЦКИЙ**

*Полоцкий государственный университет, Новополоцк*

*В работе рассмотрена проблема восстановления дорогостоящей прессовой оснастки плазменной наплавкой. Разработана технология восстановления прессового инструмента, определены наиболее оптимальные режимы процесса с применением присадочного материала в виде порошков.*

Расходы на прессовую оснастку составляют от 10 до 15 % себестоимости конечной продукции. Её внезапные поломки при длительных сроках изготовления зачастую приводят к срывам сроков поставок готовой продукции и соответствующим издержкам [1-4].

Оснастку в основном изготавливают из углеродистых низколегированных сталей. В качестве способа упрочнения применяют науглероживание и закалку на мартенситно-карбидную структуру. Твердость поверхностного слоя - 60...65 HRC (при глубине цементации 1,5-2 мм) [2]. Одним из наиболее эффективных методов восстановления, рабочей поверхности силовых элементов является наплавка. При правильно выбранном составе наплавляемого металла она позволяет не только восстанавливать поверхность, но и повышает его межремонтную стойкость [5-7]. Процесс наплавки плазменной дугой основан на использовании в качестве источника тепла струи плазмы, представляющей собой сильно ионизированное газообразное вещество, температура которого достигает 15000 °С. В качестве плазмообразующего газа используют аргон и гелий, которые обеспечивают наиболее высокую температуру плазмы.

При наплавке можно использовать присадочный материал в виде прутков, проволоки, лент и порошков [7-9]. При этом, очень важно, в каждом конкретном случае правильно выбрать материал и технологию нанесения наплавляемых покрытий.

На установке УПНС-304, плазменной наплавкой получали покрытия из диффузионно-легированных самофлюсующихся порошков. В качестве подложки использовали образцы из листа Ст-3. Наплавку проводили на обратной полярности при силе тока 100 А. При наплавке опытной партии

прошивных пуансонов были исследованы несколько режимов наплавки. В процессе подбора оптимального режима наплавки изменялись: сила тока, расстояние плазматрона от поверхности наплавляемой детали, и подача порошка. В результате было выяснено, что оптимальная сила тока = 55...60А. При больших значениях тока происходит сильный перегрев основного металла из-за малой толщины стенки детали (7- 11 мм), и он «течет» уже на первых витках наплавки. При меньших значениях тока ухудшается качество сцепления основного и наплавленного металлов.

Для получения более качественного покрытия, без скруглений и подтеков металла на торце детали, а также для уменьшения вероятности проплавления основного металла на начальной стадии наплавки целесообразно применять заглушку. При токе 60А наплавка может вестись как с заглушкой, так и без нее, но в этом случае необходимо предусмотреть больший припуск по длине пуансона. Также, в результате проведения наплавки опытной партии сварочной оснастки, было выяснено, что требуемую толщину наплавленного слоя необходимо получать за 3-4 прохода, давая время остыть детали после наплавки каждого слоя. Оптимальное расстояние между деталью и плазматроном – 10-12 мм. При большем расстоянии происходит большой перерасход порошка, а при меньших – велика вероятность проплавления металла и получения некачественного покрытия.

Расход плазмообразующего, транспортирующего и защитного газов – 35 л/ч. В качестве всех этих газов выступает аргон. Перед наплавкой порошок необходимо просушить при температуре 200-250 °С в течение 0,5 ч., т.к. порошок ПР-Х18Н9Р4Г4 очень гигроскопичен, что приводит при наплавке непросушенным порошком к большому количеству пор в наплавленном слое. После просушки порошок необходимо просеять на фракцию 100-200 мкм. Эти режимы обеспечивают получение качественно-го покрытия необходимой структуры с заданными свойствами.

#### ЛИТЕРАТУРА

- 1 Когаев В.П., Дроздов Ю.Н. Прочность и износостойкость деталей машин. – М.: Высшая школа, 1991. – 319 с.
- 2 Justin Furness. Steels? Alloy Steels [Электрон. ресурс] / AzoM. The Institute of Materials. – Режим доступа: [www.azom.com](http://www.azom.com).
3. Поляк М.С. Технология упрочнения. Технологические методы упрочнения. В 2-х т. Т.1. – М.: «Л.В.М. – СКРИПТ», Машиностроение», 1995. — 832 с
4. Донской А. В., Клубикин В. С. Электроплазменные процессы и установки в машиностроении. – Л.: Машиностроение, 1979. – 221 5. Сидоров А. И. Восстановление деталей машин напылением и наплавкой. – М.: Машиностроение; 1987. – 192 с

5. Michael A. Gwyn. Cost-Effective Casting Design: What Every Component Designer Should Know / [Электрон. ресурс]. – American Metalcasting Consortium. – Режим доступа: [www.giwindustries.com](http://www.giwindustries.com).

6. Ворошнин Л.Г., Пантелеенко Ф.И., Константинов В.М. Теория и практика получения защитных покрытий с помощью ХТО. – Минск: ФТИ; Новополоцк: ПГУ, 1999. – 133 с

7. Порошковые материалы и области их применения [электронный ресурс] [https://www.metotech.ru/art\\_poroshki\\_7.htm](https://www.metotech.ru/art_poroshki_7.htm)(дата обращения: 09.10.2019)



**ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ УПРОЧНЁННЫХ  
СЛОЕВ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ  
ИОННО-ПЛАЗМЕННОГО АЗОТИРОВАНИЯ  
НА НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ 08X18H10T**

**В.С. КАПЛЕНКО, И.Л. ПОБОЛЬ, И.Г. ОЛЕШУК**

**Физико-технический институт НАН Беларуси, Минск, Беларусь**

*Исследовано влияние режимов ионно-плазменного азотирования (ИПА) на микроструктуру, распределение микротвердости, фазовый состав и коррозионные свойства упрочненных слоев, полученных на нержавеющей стали 08X18H10T.*

Сталь 08X18H10T обладает высокой коррозионной стойкостью, ударной вязкостью, пластичностью. Она нашла широкое применение в машиностроительной, химической и пищевой промышленности для изготовления деталей и частей конструкций, функционирующих в контакте с агрессивными средами.

В некоторых случаях требуется повышение износостойкости деталей, изготавливаемых из указанной стали, в том числе используемых в узлах трения. Одним из способов повышения твердости и износостойкости поверхностных слоёв материалов является ионно-плазменное азотирование (ИПА). Ионное азотирование, как метод низкотемпературной химико-термической обработки изделий из стали и чугуна, получил широкое распространение благодаря своей управляемости, т.е. возможности оперативно измерять такие параметры технологического процесса, как состав газовой среды, температуру и время изотермической выдержки [1]. Ионное азотирование позволяет получать упрочнённые слои на нержавеющей сталях аустенитного класса за счёт образования нитридов хрома и твёрдорастворного упрочнения [2,3]. В результате образования нитридов хрома происходит увеличение твердости и износостойкости материала [4] при одновременном уменьшении содержания хрома в твердом растворе, что может приводить к снижению коррозионной стойкости [4].

Целью работы являлось изучение влияния технологических параметров ИПА на микроструктуру, распределение микротвердости, фазовый состав и коррозионные свойства упрочненных слоев, полученных на образцах из стали 08X18H10T.

ИПА образцов с размерами 20x30x10 мм проводили на установке УА-25-400/400 (ФТИ НАН Беларуси). Для сохранения коррозионной стойкости стали, наряду с обеспечением прочности и износостойкости, ИПА образцов выполняли при температурах 420, 450 и 530 °С и времени выдержки при этих температурах 12 ч в среде азота, водорода и аргона.

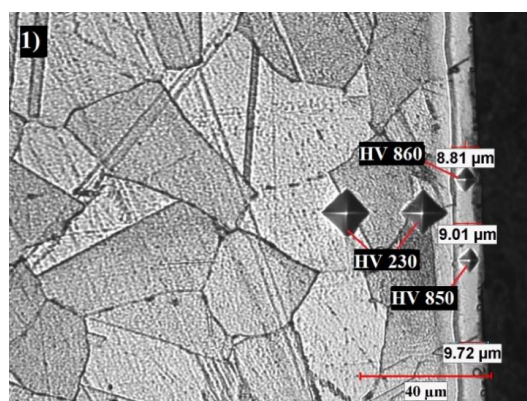
Для выявления микроструктуры азотированных слоев поперечные шлифы образцов подвергали химическому травлению в «царской водке». Структуру модифицированных слоёв стали исследовали с помощью оптического микроскопа МИ-1. Микротвёрдость на поперечном шлифе образцов-свидетелей измеряли на микротвердомере AFFRI-MVDM8 при нагрузке на индентор 25 г. Фазовый состав модифицированных слоёв образцов определяли с помощью рентгеновского дифрактометра ДРОН-3 в  $\text{CuK}_\alpha$  излучении. Исследования электрохимических свойств образцов проводили на потенциостате/гальваностате Multi Autolab/M204 в 3%-ном растворе NaCl комнатной температуры в трёхэлектродной ячейке с электродом сравнения Ag/AgCl/KCl и вспомогательным платиновым электродом методом линейной поляризации.

Металлографические исследования показали, что сталь имеет однородную структуру аустенита с высокодисперсными включениями карбидов хрома. Тонкий нитридный слой состоит из смеси нитридов железа  $\text{Fe}_{2-3}\text{N}$ ,  $\text{Fe}_4\text{N}$  и хрома  $\text{CrN}$ ,  $\text{Cr}_2\text{N}$ . Под нитридным слоем располагается диффузионная зона, состоящая из азотистого аустенита ( $\gamma$ -фаза) с высокодисперсными включениями нитридов железа и легирующих элементов (рисунок).

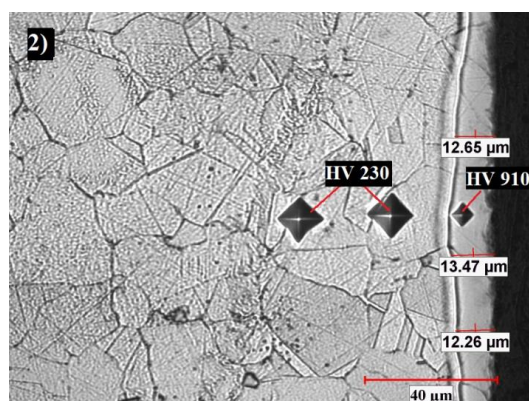
Повышение температуры азотирования от 420 до 530 °С приводит к увеличению микротвёрдости у поверхности образцов с  $\text{HV}_{0,025}$  860 до  $\text{HV}_{0,025}$  1050 и средней толщины упрочненного слоя с 9 до 20 мкм (рисунок и таблица).

Исследовано влияние режимов ИПА на коррозионную стойкость стали 08X18H10T. При низких температурах обработки 420 и 450 °С коррозионная стойкость стали сохраняется и соответствует 4 баллам по десятибалльной шкале оценки общей коррозионной стойкости металлов, как и в исходном состоянии (таблица). В случае ИПА при 530 °С скорость коррозии значительно возрастает. Упрочненный материал соответствует 6 баллам коррозионной стойкости.

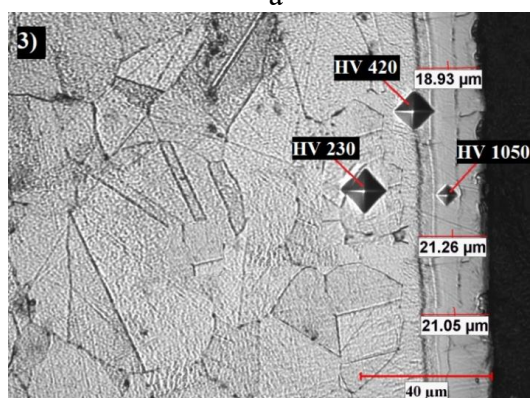
Таким образом, ИПА позволило увеличить поверхностную твёрдость стали 08X18H10T при температурах обработки 420, 450 и 530 °С до  $\text{HV}_{0,025}$  860-1050. Для предотвращения снижения коррозионной стойкости нержавеющей стали необходимо проводить процесс ионно-плазменного азотирования при температурах не выше 420-450 °С.



а



б



в

Рисунок. – Микроструктура и микротвердость образцов из стали 08X18N10T после ИПА при 420 °C (а), 450 °C (б) и 530 °C (в)

Таблица. – Зависимость микротвердости, толщины слоя и коррозионной стойкости образцов из стали 08X18N10T от температуры ИПА

Состояние стали	Температура азотирования, °C	Характеристики упрочнённого слоя		Скорость коррозии, мм/год	Потенциал коррозии, В	Ток коррозии $\times 10^{-6}$ , А
		микротвёрдость HV <sub>0,025</sub>	средняя толщина, мкм			
Исходное	—	230	—	0,031	-0,331	2,707
После ИПА	420	860	9,3	0,023	-0,324	2,134
	450	910	12,9	0,033	-0,349	2,804
	530	1050	20,0	0,207	-0,398	17,84

## ЛИТЕРАТУРА

1. Босяков М.Н., Моисеенко А.Н. // Современные технологии в образовании. 23–24 ноября 2017 г. / Минск: БНТУ, 2017. – Ч. 2. – С. 74-79.
2. Сорокин В.Г. и др. Марочник сталей и сплавов. - М.: Машиностроение, 1989. – 640 с.
3. Герасимов С.А. и др. // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2008. – 2 (632). – С. 34-37.
4. Смолякова М.Ю., Вершинин Д.С., Трегубов И.М. // Взаимодействие излучений с твердым телом: Материалы 9-й Междунар. конф., 20-22 сент. 2011 г. – Минск, 2011. – С. 80-82.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА И ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЕФОРМАЦИОННО- ПЛАКИРОВАННЫХ ГЕТЕРОГЕННЫХ ПОКРЫТИЙ

**М.А. ЛЕВАНЦЕВИЧ**

*Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси,  
Минск, Беларусь*

**И.А. КОЗЛОВСКИЙ, А.С. СТОЛЯРОВ, А.А. ГОЛУШКО**  
*Барановичский государственный университет, Беларусь*

**Введение.** Для снижения трения скольжения в подвижных сопряжениях механических систем широко используют антифрикционные покрытия с гетерогенной (неоднородной) структурой, состоящей из распределенных в пластичной массе легирующих добавок из твердосмазочных материалов (графита, дисульфида молибдена, фторопласта и др) и твердых частиц (карбидов, боридов, нитридов, ультрадисперсных алмазов и др.). В процессе эксплуатации деталей с подобными покрытиями, благодаря тому, что пластичная матрица наиболее эффективно прилегает к поверхности контртела, твердосмазочные добавки снижают трение, а твердые частицы воспринимают контактное давление в зоне трения, значительно улучшаются условия работы трибосопряжения, что способствует существенному увеличению его ресурса [1].

Формирование покрытий с гетерогенной структурой, наряду с другими методами, можно осуществлять и методом деформационного плакирования гибким инструментом (ДПИ), где в качестве гибкого инструмента используется вращающаяся металлическая щетка с проволочным ворсом, а слой покрытия на поверхности детали образуется за счет переноса ворсом щетки микрочастиц фрикционно взаимодействующего с ней материала покрытия (донора) [2]. При этом, в качестве донора целесообразно использовать материалы с гетерогенной структурой [3]. Однако, в силу недостаточной изученности процесса переноса частиц из материала донора в слой покрытия, а также триботехнических характеристик сформированных покрытий, выполнить прогнозную оценку их эксплуатационных свойств весьма затруднительно, что обуславливает необходимость проведения дополнительных исследований.

**Цель работы** заключалась в сопоставлении химических составов материала донора и сформированных из них слоев покрытий, а также в

сравнительной оценке триботехнических характеристик покрытий, сформированных методом ДПГИ, из материалов с гетерогенной структурой,.

**Методы исследований.** Анализ химического состава материала-донора, а также сформированного из этого материала методом ДПГИ слоя покрытия, проводили на сканирующем электронном микроскопе высокого разрешения "Vega" фирмы "Tescan" (Чехия) с энергодисперсионным спектрометром INCA Energy 350 с использованием детектора вторичных электронов (SE) и детектора обратно-отраженных электронов (BSE). При этом для изучения химического состава слоя покрытия использовались прямоугольные пластинки размером  $20 \times 50 \times 3$  мм из стали 45 (HRC 43...45) и серого чугуна СЧ-20 (HRC 43...45) на одной из поверхностей которых методом ДПГИ формировали покрытия (рис 1- б) с толщиной слоя 10...12 мкм из донора, представляющего собой композит на основе бронзы Бр 05С5Ц5Гр1ДМ0,5 (рис. 1- а), полученный путем спекания смеси порошков меди (83,5%), с легирующими добавками олова (5%), свинца (5%), цинка (5%) и компонентов твердой смазки - графита (1%) и дисульфида молибдена (0,5%).

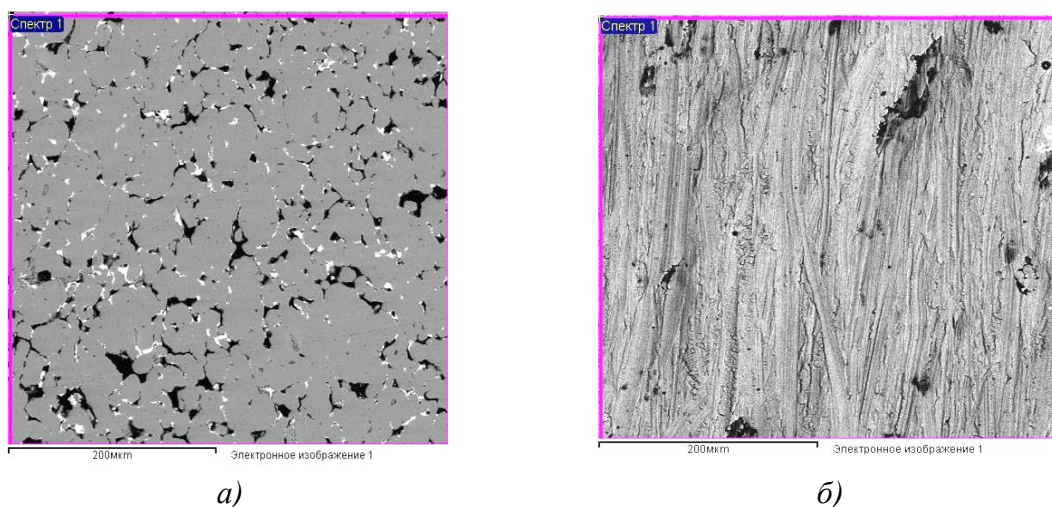


Рисунок 1. – СЭМ-изображение поверхностей материала донора (а) и сформированного из этого материала слоя покрытия (б)

Триботехнические испытания выполняли на машине трения возвратно-поступательного типа. При этом в качестве образцов использовали прямоугольные пластины размером  $20 \times 60 \times 5$  мм из стали 45 (HRC 52...55) и серого чугуна СЧ-20 (HRC 54...56), с нанесенным из этого же донора слоем покрытия толщиной 8...10 мкм, В качестве контробразца – цилиндрический ролик из незакаленного серого чугуна СЧ-20, диаметром  $10 \times 12$  мм, осуществляющий трение по покрытой поверхности пластины плоским торцом. Смазывание дорожки трения осуществлялось маслом И20А (3



капли/мин). Относительная скорость взаимного перемещения - 0,1 м/сек. Удельное давление - 2,5 МПа. В ходе испытаний регистрировали коэффициент трения скольжения и весовой износ, определяемый по разности масс образцов и контрольных образцов до испытаний и после испытаний.

**Результаты и обсуждение.** Сопоставление химических составов материала-донора и сформированного из этого материала методом ДПГИ слоя покрытия показало, что медь (матричный материал спеченного композита), а также легирующие добавки на основе металлов (цинк, олово, свинец) и неметаллов (графит и дисульфид молибдена) идентифицируются как в доноре, так и в покрытии (см. таблицу).

Таблица. – Химический состав материала-донора Бр05С5Ц5Гр1ДМ0,5 и сформированного из этого материала методом ДПГИ слоя покрытия

Вид материала	C	Cu	Zn	Mo	Sn	Pb	S	Fe	O
Донор	17,31	70,55	4,75	0,55	3,54	2,94	0,35		
Покрытие на стали	8,18	53,11	3,19	0,05	2,12	2,69	0,21	24,98	5,40
Покрытие на чугуна	7,77	58,11	3,66	0,76	3,19	2,93		17,73	5,84

При этом количественное содержание меди и легирующих добавок в слое покрытия обычно меньше, чем в доноре, хотя могут иметь место и некоторые превышения содержания в покрытии отдельных элементов. Что, возможно, связано со спецификой процесса переноса частиц донора ворсом щетки. Следует, также, отметить, появление в слое покрытия железа и кислорода. Железо, возможно, привносится как из ворса щетки, так и из поверхности основы. Кислород, скорее всего, образуется в результате окислительных процессов, которые имеют место быть при переносе ворсом щетки нагретых до высокой температуры частиц материала донора.

Анализ данных триботехнических испытаний показал, что сформированные покрытия как на пластинах из стали, так и чугуна, по сравнению с пластинами без покрытия, способствуют снижению коэффициента трения скольжения, в среднем 1,3...1,36 раза (рис. 2). При этом значения величин суммарного износа образцов и контрольных образцов снижаются, в среднем, в 1,1 и 1,3 раза, при трении по пластинам с покрытием из стали и чугуна, соответственно.

**Выводы.** При формировании антифрикционных покрытий методом ДПГИ из материалов доноров с гетерогенной структурой сформированный слой покрытия также имеет гетерогенную структуру. В процессе плакирования ворсом щетки может переноситься от 60 до 100% частиц матричной металлической основы донора и его легирующих элементов из металлов, и

от 10 до 50% легирующих элементов из неметаллов. При этом в сформированном слое покрытия неизбежно появление железа (17...25%) и кислорода (5...6%). Благодаря сформированному покрытию представляется возможным снизить коэффициент трения скольжения в подвижном сопряжении в 1,3...1,36 раза и уменьшить износ в 1,1...1,3 раза.

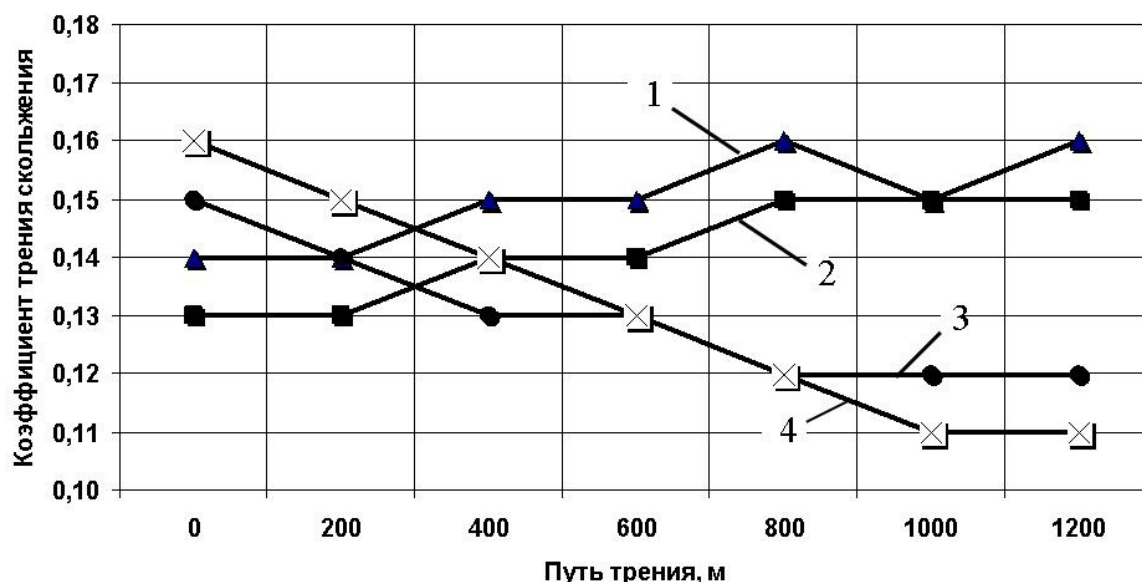


Рисунок 2. – Экспериментальные зависимости коэффициента трения скольжения от пути трения контробразца по образцам, соответственно, из стали и чугуна без покрытия (1, 2) и с покрытием (3, 4)

## ЛИТЕРАТУРА

1. Витязь, П.А. Повышение ресурса трибосопряжений активированными методами инженерии поверхности / П.А. Витязь, В.И. Жорник, М.А. Белоцерковский, М.А. Леванцевич. – Минск: Изд-во «Издательский дом Беларуская навука», 2012. - 348 с.
2. Белевский Л.С.. Пластическое деформирование поверхностного слоя и формирование покрытия при нанесении гибким инструментом. - Магнитогорск: Изд-во Магнитогор. лица РАН, 1996. – 230 с.
3. Леванцевич М.А. Улучшение плавности хода подвижных узлов станков формированием антифрикционных покрытий на направляющих скольжения / М.А.Леванцевич // Перспективные технологии. Под. ред. В.В. Клубовича. - Витебск: Изд-во УО «ВГТУ». – 2011. – С. 542 – 566

## УПРОЧНЕНИЕ НОЖЕЙ ФРЕЗЕРНО-БРУСУЮЩИХ СТАНКОВ ДЛЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДРЕВЕСИНЫ В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ УСЛОВИЯХ

**И.К. КЛЕПАЦКИЙ, В.В. РАПОВЕЦ**

*Белорусский государственный технологический университет,  
Минск, Беларусь*

*В данной статье представлены результаты проведенных экспериментальных исследований технологической стойкости лезвий дереворежущих ножей из легированной стали 6ХС, установленных взамен ножей базового комплекта из стали 40Х10С2М зарубежного производства, эксплуатируемых на предприятии ОАО «Борисовский ДОК». По результатам промышленной апробации были определены методы упрочнения ножей, которые позволили добиться результатов технологической стойкости, равными и превосходящими по стойкости ножи импортного производства (период технологической стойкости увеличен до 20% в сравнении с ножами, эксплуатируемыми на предприятии).*

Отечественными и зарубежными учёными к настоящему времени проведен ряд исследований по направлению повышения эффективности работы агрегатного оборудования. Постоянно возрастающие требования к качеству продукции из древесины, рациональное и экономное использование древесного сырья требуют новых разработок, направленных на совершенствование агрегатного оборудования, улучшение показателей его работы, а также создание новых образцов машин, позволяющих более эффективно перерабатывать древесное сырье.

Ножи фрезерно-брусующих станков изготавливают из различных инструментальных сталей, например, углеродистой стали У8А, инструментальных легированных сталей 6ХС и 9ХС повышенной прокаливаемости, высоколегированных сталей марок 4Х5МФ, 55Х6В3СМ и 55Х7ВСМФ [1, 2]. Для фрезерно-брусующих станков также применяются различные методики увеличения технологической стойкости режущего инструмента [3].

Нами была изготовлена опытная партия ножей из стали 6ХС для торцово-конических фрез конструкции, аналогичной импортной (производства Faba, Польша, сталь 40Х10С2М), выбранная на основании ранее



проведенных исследований [4]. Ножи были подвергнуты различным методам поверхностной модификации, позволяющих повысить их технологическую стойкость: термическая обработка (ТО) [5], комбинация ТО и магнитно-импульсной обработки (МИО) [6], а также ТО и ионно-вакуумного азотирования (ИВА) [7].

Технологические параметры проведения промышленных испытаний в условиях производства ОАО «Борисовский ДОК» следующие: фрезерно-брусующая машина второго ряда V25 в составе линии агрегатной переработки древесины LINK (Германия), материал обработки – древесина хвойных пород (сосна, ель; соотношение, %, состава пород 93/7 соответственно); объём обработки – 2100 м<sup>3</sup>; время работы – 40 ч.; скорость подачи – 36 м/мин; частота вращения фрез – 750 об/мин.

За время проведения опытно-промышленных испытаний на участок переработки поступала древесина с большим разбросом диапазона относительной влажности (20–45%) и наличием абразивных элементов (металлических и неметаллических включений), что негативно сказывалось на работоспособности дереворежущего инструмента по сравнению с обработкой чистой и более однородной по влажности свежесрубленной древесины.

Фотографии режущей кромки ножей и максимального радиуса округления по длине рабочей части ножа, а также численное его значение ( $\rho_{\max}$ , мкм), после испытания будут приведены под описанием методов поверхностной модификации.

Методом слепков [8, 9] определялся радиус округления  $\rho$ , мкм, режущей кромки ножа (рис. 1).

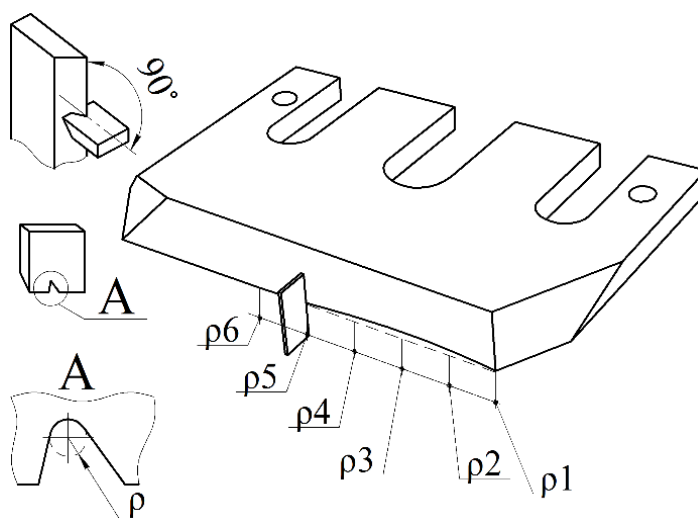


Рисунок 1 – Метод слепков

Часть из комплекта ножей подверглись термической обработке – закалке при температуре 750<sup>0</sup>С. После ТО твёрдость режущей кромки составила 56 HRC.

Результаты измерений радиусов округления режущей кромки  $\rho_n$ , мкм, опытного образца за 5 смен работы (1 смена длится 8 часов) приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты измерений радиусов округления режущей кромки ножа из Стали 6ХС после ТО

Радиус округления после n смен работы	Смены				
	1	2	3	4	5
$\rho_1$ , мкм (1мм от края кромки)	38	63	79	98	133
$\rho_2$ , мкм (15мм)	39	65	79	102	139
$\rho_3$ , мкм (30мм)	36	61	74	95	124
$\rho_4$ , мкм (45мм)	28	49	60	66	83
$\rho_5$ , мкм (60мм)	17	29	36	43	58
$\rho_6$ , мкм (72мм)	8	9	16	23	33

Часть ножей из стали 6ХС подвергалась модификации методом МИО с величиной энергии 8 кДж. Твёрдость поверхности ножа по результату модификации составила 57 HRC. Результаты измерений  $\rho_n$ , мкм, режущей кромки приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты измерений радиусов округления режущей кромки ножа из Стали 6ХС после ТО+МИО

Радиус округления после n смен работы	Смены				
	1	2	3	4	5
$\rho_1$ , мкм (1мм)	38	65	81	94	117
$\rho_2$ , мкм (15мм)	37	66	79	95	122
$\rho_3$ , мкм (30мм)	35	61	71	88	105
$\rho_4$ , мкм (45мм)	26	46	56	61	69
$\rho_5$ , мкм (60мм)	16	27	33	40	49
$\rho_6$ , мкм (72мм)	9	10	15	22	29

Поверхность части ножей модифицировали в камере вакуумно-плазменной установке, в среде N-H-Ar при температуре 390<sup>0</sup>С и времени выдержки 12 часов. Твёрдость после проведённой модификации ИВА со-

ставила 50 HRC. Результаты измерений  $\rho_n$ , мкм, режущей кромки ножей модифицированных методом ТО+ИВА приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты измерений радиусов округления режущей кромки ножа из Стали 6ХС после ТО+ИВА

Радиус округления после n смен работы	Смены				
	1	2	3	4	5
$\rho_1$ , мкм (1мм)	121	–	–	–	–
$\rho_2$ , мкм (15мм)	163	–	–	–	–
$\rho_3$ , мкм (30мм)	152	–	–	–	–
$\rho_4$ , мкм (45мм)	138	–	–	–	–
$\rho_5$ , мкм (60мм)	93	–	–	–	–
$\rho_6$ , мкм (72мм)	69	–	–	–	–

Невысокую технологическую стойкость показывает метод модификации ТО+ИВА. Аварийный износ режущей кромки (рис. 2, график ТО+ИВА) показывает, что возможно была нарушена технология модификации инструмента. Более стабильную технологическую стойкость показали ножи, модифицированные методами ТО и ТО+МИО.

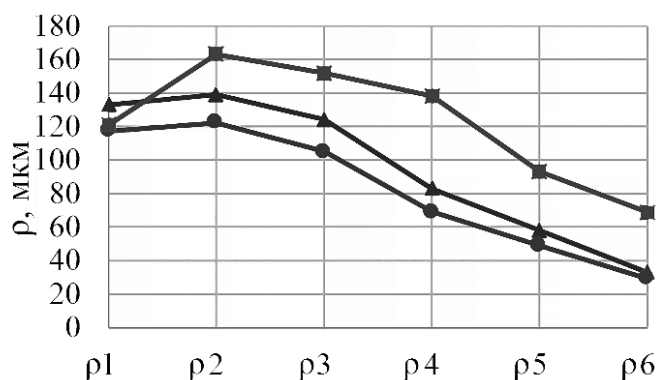


Рисунок 2 – Сравнительный график изменения радиуса округления режущей кромки по её длине в зависимости от метода обработки: ▲ – ТО; ● – ТО + МИО; ■ – ТО+ИВА.

По результатам проведённых производственных испытаний на ОАО «Борисовский ДОК», были получены следующие результаты:

1. Комплект ножей, упрочнённых методом ТО+ИВА не подтвердил свою эффективность, отработав лишь 4 часа ( $250 \text{ м}^3$  круглых лесоматериалов), при этом полностью потеряв режущую способность древесины сосны. Максимальный радиус округления режущей кромки  $\rho_{\text{max}}$  составил 163 мкм.

2. Лучшую технологическую стойкость, по сравнению с комплектом ножей, упрочнённых методом ТО+ИВА, показали ножи, модифицированные термическим способом, отработав 40 часов ( $2100 \text{ м}^3$ ) и при этом  $\rho_{\text{max}} = 180 \text{ мкм}$  (средний показатель технологической стойкости ножей, используемых на предприятии –  $\rho_{\text{max}} = 178 \text{ мкм}$ ).

3. Самый высокий показатель технологической стойкости – у ножей, модифицированных по технологии МИО+ТО. Максимальный радиус округления составил 156 мкм по истечению 40 часов работы. Было обработано  $2100 \text{ м}^3$  круглых лесоматериалов.

Различные способы упрочнения ножей позволили добиться результатов технологической стойкости равными и превосходящими по стойкости ножи импортного производства (увеличен  $\sim 20\%$ ). Из этого можно сделать вывод, что ножи соответствуют эксплуатационным требованиям и могут быть рекомендованы для использования на отечественных деревообрабатывающих предприятиях, использующих агрегатную технологию переработки древесины хвойных пород.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. F. Ding, M. Benaoudia, P. Bédard, R. Lanouette, C. Lejeune, P. Gagné. Wood chip physical quality definition and measurement. *Pulp & Paper Canada*, 106:2, 2005. p. 27-32.
2. Раповец В. В., Гриневич С. А., Бурносков Н. В. Конструкция и расчеты фрезерно-брусующих станков. Минск: БГТУ, 2015. 82 с.
3. Зотов Г. А., Памфилов Е. А. Повышение стойкости дереворежущего инструмента. М.: Экология, 1991. 304 с.
4. Клепацкий И. К. Эффективные методы повышения технологической стойкости ножей для агрегатной переработки древесины // Труды БГТУ. Серия 1, Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. 2018. № 1(204). С. 190–195.
5. ГОСТ 5950-2000 Инструментальная штамповая сталь. Марки стали. Применение стали.
6. Алифанов А. В. Повышение эксплуатационных свойств дереворежущих ножей комбинированным методом нанесения вакуумных упрочняющих покрытий и магнитно-импульсной обработки / Алифанов А.В. [и др.] // Литье и металлургия. 2014. № 2. С. 95-100.
7. A. Sokołowska, J. Rudnicki, E. Wnukowski, P. Beer, T. Wierzchoń, K.J. Kurzydłowski Glow discharge assisted low-temperature nitriding of knives used in wood processing. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, Vol. 37, issue 2, 2009. p. 690-693.
8. Глебов И. Т., Абдулов А. Р. Оборудование отрасли: исследование микрогеометрии режущих кромок лезвий. М.: Екатеринбург: УГЛТУ, 2013. 9 с.
9. Клепацкий И. К. Динамика потери режущей способности лезвий малоножевых фрез при агрегатной переработке древесины // Труды БГТУ. Серия 1, Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. 2019. № 1(216). С. 190–195.

## УПРОЧНЕНИЕ И ВОССТАНОВЛЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ С УЧЕТОМ УСЛОВИЙ ИЗНАШИВАНИЯ СОПРЯЖЕНИЙ

**А.В. ДУДАН**

*Полоцкий государственный университет, Беларусь*

**Ю.А. ХАРЛАМОВ**

*Восточноукраинский национальный университет им. В. Даля,*

*Северодонецк, Украина*

**В.Н. ЛОПАТА**

*ПРТП «Укргазэнергосервис», Киев, Украина*

*Предложена классификация сопряжений деталей машин с учетом условий их трения и изнашивания, которая может быть использована при проектировании поверхностных слоев с переменными толщиной и свойствами и соответствующих упрочняющих и восстановительных технологий.*

Наиболее известными являются такие технологии восстановления деталей, как подефектная, маршрутная, типовая, групповая и модульная [1]. Подефектную технологию разрабатывают для устранения отдельных повреждений, а маршрутную – для устранения сочетаний повреждений. Однако заслуживает внимания подход к проектированию поверхностных слоев и технологии восстановления деталей, учитывающий условия изнашивания сопряжений.

Сопряжения поверхностно упрочняемых и восстанавливаемых деталей по условиям изнашивания их контактирующих поверхностей можно разделить на 11 групп, из которых первые пять групп соответствуют классификации подвижных сопряжений деталей машин, разработанной проф. Прониковым А.С. [2]. Именно износ сопряжения является геометрической характеристикой потери его начальных показателей и выходным параметром. По характеру взаимного сближения деталей сопряжения подразделяются на два типа: I-й - с постоянными условиями контакта; II-й - с переменными условиями контакта. В сопряжениях II типа происходит самонастройка изношенных деталей и износ больше сказывается на функциональных свойствах сопряжения.

Для сопряжений I-го типа характерны одинаковые условия изнашивания для точек поверхностей, расположенных на одной траектории. Здесь к I-му типу могут быть отнесены: осевые подшипники скольжения; шестеренчатые насосы (торцовые поверхности шестерен и боковые стенки корпуса насоса); конические тормоза и фрикционные муфты; торцевые уплот-

нения и пр. Примером сопряжений II типа являются: запорные прецизионные пояски деталей запорной арматуры; шаровые краны; диски фрикционных муфт; торцевые уплотнения; конусные краны и др. Интенсивность и продолжительность изнашивания на окружности определенного радиуса каждой из поверхностей будет одинаковой. Будет одинаковым износ по всей окружности и для анализа деталей достаточно рассмотреть осевое сечение. На этой основе могут быть спроектированы детали с поверхностными слоями переменными толщиной и свойствами.

У сопряжений 2-й группы условия изнашивания сохраняются только для одной детали. К сопряжениям I типа можно отнести: колодочные тормоза с жестким закреплением колодки; ходовой винт-гайка; шестеренчатые насосы (контакт головок зубьев и корпуса насоса) и др. Равномерный износ проявляется у одной из сопрягаемых деталей, а для другой неравномерный или даже имеет локальный характер. Примерами сопряжений II типа являются: вал-подшипник скольжения; осевые опоры скольжения с самоустанавливающимися несущими поверхностями (колодками); колодочные тормоза с самоустановкой колодок; круговые направляющие скольжения при эксцентричной нагрузке; центробежная колодочная муфта; тормозные диски; дисковый тормоз и др.

Для сопряжений 3-й и 4-й групп характерно отсутствие постоянных условий изнашивания для всех точек обоих тел, что приводит их к неравномерному износу. К 3-й группе относятся сопряжения с низшими кинематическими парами, а к 4-й – с высшими, когда идеальный контакт имеет место при касании по линии или в точке. К сопряжениям I-го типа 3-й группы относятся: золотниковые пары в гидрораспределителях; поршневые кольца-гильза цилиндра; линейные подшипники скольжения и др. Примерами сопряжений II типа этой группы являются: пластинчатый насос; поступательные направляющие скольжения; кулиса-камень; пластины-корпус и пластины-ротор в пластинчатых насосах и гидромоторах; пазы полумуфт и выступы промежуточного диска крестовых муфт; пружинно-кулачковая предохранительная муфта и др.

Примерами сопряжений I-го типа 4-й группы являются: зубчатое зацепление; кулачок-толкатель; шестеренчатые насосы (зубья шестерен) и др. К сопряжениям II-го типа этой группы относятся: колесо-рельс; подшипники и направляющие качения; обгонная фрикционная роликовая муфта; фрикционные катки; шариковый винт и др.

К 5-й группе Проников А.С. относит поверхности деталей, контактирующие с внешней средой – почвой, породой, обрабатываемой деталью или заготовкой, потоком жидкости или гидроабразивной среды и пр. Характер взаимодействия с этой средой и будет определять форму изношенной поверхности. Примерами сопряжений I-го типа являются: режущий инструмент с жесткой установкой; зуб ковша экскаватора; контакт загото-

вок с инструментом при волочении, экструзии, дорновании; лопасти мешалок и пр. К сопряжениям II-го типа 5-й группы могут быть отнесены: лемехи плугов; плавающий режущий инструмент; дробилки молотковые и роторные; струйно-абразивная обработка; загрузочные устройства доменных печей и др.

В 6-ю группу входят сопряжения деталей с гарантированным натягом, поверхности которых подвергаются фреттинг-коррозии. В качестве примеров таких сопряжений можно привести: посадки подшипников на вал или в корпус; соединение бронзового венца червячного колеса со стальной ступицей; поршневые пальцы; сопряжения поверхностей валов со ступицами лопаток турбин, компрессоров бандажей железнодорожных колес, импеллера с валом в химическом реакторе и т. д.; клиновые, заклепочные, штифтовые и др. соединения; и пр.

В 7-ю группу включены подвижные сопряжения деталей, контактирующие через твердую среду. В качестве примеров можно привести взаимодействие инструментов с обрабатываемыми материалами при прокатке, штамповке, притирка (притир-абразивная среда-деталь); конусные дробилки; щековые дробилки; валковые дробилки и пр.

В 8-ю группу входят подвижные и неподвижные сопряжения деталей, контактирующие через эластичную среду. В качестве примера можно привести герметизирующие устройства, а также различные запорные устройства.

В 9-ю группу входят запорные и регулирующие устройства, работающие в режиме замыкания и размыкания и предназначенные для перекрытия потоков среды. Краны (шаровые и конусные), у которых запирающий или регулирующий элемент, имеющий форму тела вращения или его части, поворачивается вокруг собственной оси, произвольно расположенной по отношению к направлению потока рабочей среды. Клапаны (вентили), у которых запирающие элементы (тарельчатые (золотниковые) или конические) перемещаются параллельно оси потока рабочей среды. Задвижки, у которых запирающий или регулирующий элемент перемещается перпендикулярно оси потока рабочей среды. Клиновые задвижки с двухдисковым или упругим клином. Дисковые затворы, у которых запирающий или регулирующий элемент имеет форму диска, поворачивающегося вокруг оси, перпендикулярной или расположенной под углом к направлению потока рабочей среды.

В 10-ю группу включены электрические контакты, которые могут быть разрывными, скользящими и неподвижными. Особую сложность представляет работа скользящих контактов. Одновременное действие механических, тепловых и электрических факторов приводит к существенному изменению свойств контактирующих материалов и их фрикционно-износостойких характеристик.

В 11-ю группу следует выделить специальные сопряжения, работающие в условиях трения в вакууме, низких температур и пр.

Данная классификация сопряжений позволяет более обоснованно подходить к проектированию поверхностных слоев деталей, в том числе с переменными свойствами и толщиной, обеспечивающих увеличение ресурса работы. Классификация может быть также использована для создания типовых и модульных технологических процессов упрочнения и восстановления сопряжений деталей машин.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Восстановление деталей машин: Справочник / Ф.И. Пантелеенко, В.П. Лялякин, В.П. Иванов, В.М. Константинов; Под ред. В.П. Иванова. – М.: Машиностроение, 2003. – 672 с.
2. Проников А.С. Параметрическая надежность машин. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 560 с.



УДК 658.512

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ  
КАФЕДРЫ ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЯ  
МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА ВИТЕБСКОГО  
ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО  
УНИВЕРСИТЕТА В ОБЛАСТИ ИННОВАЦИОННЫХ  
ТЕХНОЛОГИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ**

***В.И. ОЛЬШАНСКИЙ, В.В. ПЯТОВ, С.С. КЛИМЕНКОВ,  
Н.В. БЕЛЯКОВ, Ю.Е. МАХАРИНСКИЙ, С.В. ЖЕРНОСЕК,  
А.С. КОВЧУР, И.С. АЛЕКСЕЕВ, И.А. ДОРОШЕНКО,  
Д.Г. ЛАТУШКИН, А.Н. ГОЛУБЕВ, Р.В. ОКУНЕВ***

***Витебский государственный технологический университет, Беларусь***

*Описаны направления исследований кафедры в областях: САПР в машиностроении; оптимизации управления плоским врезным и профильным шлифованием; методики проектирования силовых шнековых машин для экструзии многофункциональных композиционных материалов; электроформования полимеров; технологий и оборудования для гидрокриогенной резки материалов; энергоэффективных технологии термической обработки и сушки изделий и материалов; технологий, оборудования, испытательных установок для материалов специального назначения; использования осадков химводоподготовки.*

Основными научно-техническими направлениями исследований кафедры являются:

1. *Методическое, алгоритмическое и программное обеспечение САПР в машиностроении.* В рамках направления разработана и внедрена САПР ТП изготовления корпусных деталей металлорежущих станков. Система позволяет производить автоматизированное проектирование ТП изготовления корпусных деталей в автоматическом и диалоговом режимах или их сочетаниях; создавать и использовать базы данных функциональных модулей, комплексных технологических процессов, нормативно- справочной информации предприятий; формировать комплект стандартных технологических документов. Также в рамках направления разрабатывается СППР синтеза УСП позволяющая производить автоматизированное проектирование 3-d моделей компоновок УСП, их чертежей, а также технологических схем их сборки и разборки. Для разработки системы предложен ряд положений по модернизации теории базирования. Использование системы позволяет: снижать временные затраты на подготовку производства; повысить качество продукции; собирать приспособления сборщиком невысокой квалификации.

2. *Оптимизация управления плоским врезным и профильным шлифованием.* В рамках направления разработаны: математические модели ограниче-

ний производительности, оценки глубины и суммарной интенсивности прижогов и процесса затупления шлифовального круга; аналитический метод оценки параметров граничного и ступенчатого алгоритмов управления рабочим циклом; способ оптимизации ступенчатого алгоритма управления рабочим циклом для различных условий шлифования; методы ускоренного экспериментального определения (на стенде и в процессе реализации рабочего цикла) параметров математических моделей производительности и тепловых ограничений для плоского врезного шлифования. Проведен анализ влияния условий шлифования на показатели ограничений производительности и результаты шлифования. Разработано программное обеспечение для определения параметров шлифования, а также новое эффективное устройство для программной балансировки шлифовального круга на шпинделе плоскошлифовального станка. Разрабатывается методическое, алгоритмическое и программное обеспечение прогнозирования износа и правки шлифовальных кругов при зубошлифовании прецизионных зубчатых колес.

3. *Методика проектирования силовых шнековых машин для экструзии многофункциональных композиционных материалов.* В рамках направления разработана теоретическая модель процесса деформации пластичной среды шнеком и экструзионным инструментом, методики выполнения конструкторских расчетов по проектированию шнека и формирующего инструмента и методики исследования физических и технологических свойств сжимаемых пластично-вязких сред. Практическая значимость выполненного проекта состоит в создании метода исследования триботехнических и реологических свойств пластифицированных композиций, методики выполнения конструкторских расчетов по проектированию шнека и формирующего инструмента, разработке типовой технологической инструкции изготовления изделий из пластичных сред на шнековом экструдере, разработке документации на конструкцию шнекового экструдера. В настоящее время ведутся работы над созданием основанной на данной методике прикладной системы автоматизированного проектирования деталей и узлов шнековых машин.

4. *Технологии и оборудование для гидрокриогенной резки материалов.* В рамках направления начата разработка конструкции оборудования и технологии гидрокриогенной резки материалов. При гидроабразивной резке скорость истечения воды превышает скорость звука в 3...4 раза, давление составляет 300...600 МПа. Абразивные частицы в процессе ударного взаимодействия с обрабатываемой поверхностью изнашиваются. Их рабочие грани затупляются, что приводит к необходимости частой смены абразивной суспензии. В разработках кафедры абразивные частицы в виде льда образуются непосредственно в струе воды в процессе ее охлаждения распыленным жидким азотом при температуре порядка -150°C. Размеры частиц льда, их содержание в струе опреде-

ляется скоростями движения стру воды и распыления жидкого азот, а также их массами. Разрабатываемые технологии и оборудование позволят существенно упростить и удешевить технологию резки материалов.

5. *Электроформование полимеров.* В рамках направления разработана установка электроформования полимеров, а также технология позволяющая получать нетканые изделия из нановолокон для медицины и ветеринарии в качестве биосовместимого заменителя существующих перевязочных материалов при лечении ран и других повреждений кожи.

6. *Энергоэффективные технологии термической обработки и сушки изделий и материалов в машиностроении, легкой и текстильной промышленности.* В рамках направления разработаны научно-обоснованные методы интенсификации технологических процессов влажно-тепловой обработки и сушки материалов, при различных способах энергоподвода, обеспечивающие сокращение потребляемой энергии на единицу продукции, уменьшение массы и габаритных размеров сушильных установок, повышение качественных показателей материалов и изделий, предложены рекомендации по проектированию современного оборудования для термической обработки и сушки и выбору режимных параметров работы.

7. *Технологии, оборудования, испытательных установок для материалов специального назначения.* В рамках направления: разработан технологический процесс получения водотермостойкого материала для защитной одежды на основе полимерного покрытия трикотажного материала, получен опытный образец материала. Проведены экспериментальные исследования по теплофизическим и физико-механическим свойствам материала. Выполнены теоретические исследования процесса теплообмена горячей жидкой и газообразной среды с плоским пакетом материалов. Изготовлен макетный вариант водотермозащитного костюма. Проведена лабораторная и промышленная апробация принятых конструктивных и технологических решений.

8. *Использование осадков химводоподготовки ТЭЦ.* В рамках направления разработаны: технологии изготовления керамической терракотовой плитки с использованием техногенных продуктов химводоподготовки (ХВО) ТЭЦ, рекомендации по использованию добавки на основе осадков ХВО и муллитсодержащих отходов при изготовлении керамических клинкерных материалов, огнеупорных керамических материалов и керамической штукатурки.

Научные исследования выполнены в рамках ГПНИ «Физическое материаловедение, новые материалы и технологии», «Функциональные и композиционные материалы, наноматериалы», «Информатика и космос, научное обеспечение защиты от чрезвычайных ситуаций», ГПНИ «Энергоэффективность», «Энергоэффективные технологии», РНТП «Инновационное развитие Витебской области» и др.

Титульные листы презентаций докладов

МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ  
«ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ»  
(«ИНТЕХМАШ – 20»)

**КОМБИНИРОВАННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ  
ДЕТАЛЕЙ УЗЛОВ ТРЕНИЯ СКОЛЬЖЕНИЯ.  
ФОРМИРОВАНИЕ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ НА  
ПОВЕРХНОСТИ ПОЛИМЕРНЫХ ДЕТАЛЕЙ**

***Белоцерковский М.А.***

*доктор технических наук, профессор,  
заведующий лабораторией "Объединенного  
института машиностроения" НАН Беларуси*





## Проектирование комплексов технологического оборудования аддитивного и субтрактивного производства

Базров Борис Мухтарбекович,  
Хейфец Михаил Львович,  
Чижик Сергей Антонович,

ИМАШ РАН,  
ИПФ НАН Беларуси,  
ИТМО НАН Беларуси



**Объединенный институт машиностроения  
Национальной академии наук Беларуси**

**ПЛАСТИЧНЫЕ СМАЗКИ С ГЕТЕРОГЕННОЙ  
ДИСПЕРСНОЙ ФАЗОЙ  
ДЛЯ ТЯЖЕЛОНАГРУЖЕННЫХ И  
ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ УЗЛОВ ТРЕНИЯ**

**Жорник В.И., д.т.н.; Ивахник А.В., к.т.н.;  
Запольский А.В.**

**Международная научно-техническая конференция  
«Инновационные технологии в машиностроении  
(ИННТЕХМАШ - 20)»**

**Новополоцк-Минск,  
21-22 апреля 2020 г.**

# **ВЛИЯНИЕ ВРЕМЕНИ ОТЖИГА ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ ИЗ ПСЕВДОСПЛАВА «Х20Н80+АД-1» НА ЕГО СТРУКТУРНО-ФАЗОВОЕ СОСТОЯНИЕ И ТВЕРДОСТЬ**

Белоцерковский М.А., д-р техн. наук;

Кукареко В.А., д-р физ-мат. наук;

Григорчик А.Н., канд. техн. наук;

Астрашаб Е.В.

Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси,  
220072, г. Минск, ул. Академическая, 12





**ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ  
ИНСТИТУТ**

НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ

**ИННОВАЦИОННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И  
ТЕХНОЛОГИИ ИНЖЕНЕРИИ ПОВЕРХНОСТИ В  
МАШИНОСТРОЕНИИ**

МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ  
«ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ»  
21-22 АПРЕЛЯ 2020 , г. НОВОПОЛОЦК





# EXIDER

РЕШЕНИЯ ДЛЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ





LIETUVOS  
INOVACIJŲ  
CENTRAS

# АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ДИГИТИЗАЦИИ ПРОМЫШЛЕННОСТИ В ЛИТВЕ

ANALYSIS OF INDUSTRY DIGITIZATION OPPORTUNITIES IN LITHUANIA

Доктор социальных наук **ЯКУБАВИЧЮС Артурас**  
Начальник департамента услуг поддержки инноваций Литовского инновационного центра  
Доцент Вильнюсского технического университета им. Гедиминаса

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**  
**ВИТЕБСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ**  
**«ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ»**



**Тема доклада:**

**«НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ КАФЕДРЫ  
ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЯ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО  
ПРОИЗВОДСТВА ВИТЕБСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА В ОБЛАСТИ  
ИННОВАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ»**

**Ольшанский В.И., Пятов В.В., Клименков С.С., Беляков Н.В.,  
Махаринский Ю.Е., Жерносек, С.В., Ковчур А.С., Алексеев И.С.,  
Дорошенко И.А., Латушкин Д.Г., Голубев А.Н., Окунев Р.В.**



**ВИТЕБСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ**

**г. Витебск, 2020**

# **Влияние погрешностей изготовления и сборки на эксплуатационные характеристики передач эксцентрикового типа**

**П. Н. Громыко, д-р техн. наук,  
профессор,**

**С.Н. Хатетовский, канд. техн. наук,  
доцент**



Министерство образования Республики Беларусь  
Учреждения образования «Полоцкий Государственный Университет»  
Пятая международная научно-техническая конференция  
«ИннТехМаш-20»

**К 50-летию машиностроительных  
специальностей  
и 15-летию научно-технологического парка  
Полоцкого государственного университета**

*Попок Н.Н., д.т.н., профессор,  
заведующий кафедрой «Технология  
и оборудование  
машиностроительного  
производства»*

21-22 апреля 2020 г.  
г. Новополоцк



